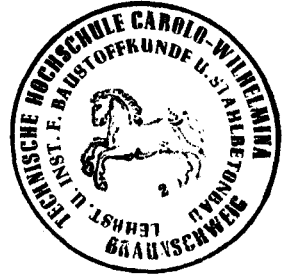


30-0383/001



49

Einfluß des Zuschlaggesteins und der
Kornzusammensetzung auf die Verform-
barkeit von Straßenbetonen unter
Biegebeanspruchung

Untersuchungsbericht

vorgelegt von

Prof. Dr.-Ing. K. Kordina

und

Dipl.-Ing. R. Lewandowski

30-0383/001

00

Februar 1966

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Vorbemerkung	1
2. Untersuchung der Versuchsmateriale	3
2.1 Zuschlaggesteine	3
2.2 Bindemittel	10
3. Herstellung der Versuchsbetone	11
3.1 Sieblinien	12
3.2 Zementleimdosierung	14
3.3 Frischbetoneigenschaften	15
4. Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse . . .	17
4.1 Probekörper und Prüfungen	18
4.2 Lagerung der Probekörper	18
4.3 Untersuchung der Probekörper, Zusatzversuche .	20
4.4 Hauptversuche an Balken 20 x 20 x 90 cm ³ . . .	31
4.4.1 Biegezugfestigkeit	31
4.4.2 Dehnungen und Elastizitätsmodul	37
4.4.3 Bruchdehnungen	43
5. Zusammenfassung	47
6. Literaturhinweise	50

1. Vorbemerkung

Versuche über den Einfluß der Beschaffenheit und der Kornzusammensetzung der groben Zuschläge auf die Eigenschaften der Betone wurden bereits vor 1937 von O. Graf [1] durchgeführt. Sie dienten der Klärung von Fragen zur zweckmäßigen Herstellung von Straßenbaubetonen. Die Versuchsergebnisse trugen zur Aufstellung und - später - zur Erweiterung von "Richtlinien für den Bau der Betonfahrbahndecken der Reichskraftfahrbahnen" bei.

Die damaligen Untersuchungen des Verformungs- und Biegebruchverhaltens von Straßenbetonen blieben überwiegend auf Betone mittlerer Güten begrenzt. Die Biegezugfestigkeiten der Betone wurden seinerzeit an Balken mit den Abmessungen $10 \cdot 10 \cdot 56 \text{ cm}^3$ und $15 \cdot 10 \cdot 70 \text{ cm}^3$ ermittelt, die Verformungen der Betone unter Biegebeanspruchungen wurden an Balken $10 \cdot 10 \cdot 56 \text{ cm}^3$ studiert.

In neuerer Zeit wurden zur gleichen Themenstellung von Johnes und Kaplan [2,3] Untersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche zeigen lediglich den Einfluß der Zuschlagstoffeigenschaften auf die Biegezug- und Druckfestigkeiten höherwertiger Betone, ohne deren Verformungseigenschaften zu berücksichtigen

Im heutigen Betonstraßenbau werden in der Regel höhere Betongüten verwendet als vor dem Kriege; überwiegend wird B 450 gefordert. Darüberhinaus wird häufig mit gröberen Kornzusammensetzungen, sandarmen Gemischen und Ausfallkörnungen gearbeitet. Das Verformungsverhalten derartiger Betone unter Biegebeanspruchung ist bisher weitgehend ungeklärt. Durch die vorliegende Untersuchung sollte bestimmt werden, inwieweit die Kornzusammensetzung und die Art der verwendeten Zuschlaggesteine auf die Verformbarkeit von Straßenbetonen von Einfluß sind.

Nach wiederholter Aussprache mit Mitgliedern des Arbeitsausschusses Betonstraßen der Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen wurden die Einzelheiten des Versuchsprogramms festgelegt.

Untersucht wurden drei unterschiedliche Kornzusammensetzungen, deren Sieblinien sich an den "Richtlinien für den Betonstraßenbau" orientieren: Es handelte sich um sandarme Gemische, sandreiche Gemische sowie um Mischungen mit Ausfallkörnungen im Bereich 3 - 15 mm. Als Feinanteil wurde bei allen Kornzusammensetzungen Rheinsand gewählt, die Grobanteile wurden variiert. Hierfür standen 6 verschiedene Zuschlaggesteine zur Verfügung.

Die Hauptversuche wurden so angelegt, daß die Versuchsverhältnisse weitgehend den im Betonstraßenbau herrschenden Umständen entsprechen: Als Probekörper für die Verformungsmessungen wurden Balken mit den Abmessungen $20 \cdot 20 \cdot 90 \text{ cm}^3$ gewählt; die Höhe der Versuchskörper entspricht somit etwa der Dicke einer Betonfahrbahnplatte. Durch Anstriche wurde angestrebt, daß das Anmachwasser der Betone aus den Proben nur an einer Seite verdunsten konnte. Auf diese Weise wurde versucht, die Schwindinflüsse auf die Proben den Verhältnissen anzugleichen, die beim Austrocknen von Betonfahrbahnplatten bestehen.

Zusätzlich zu den Hauptversuchen an dem Standardprobekörper $20 \cdot 20 \cdot 90 \text{ cm}^3$ fanden Untersuchungen in Anlehnung an die deutschen Richtlinien zur Prüfung von Beton (DIN 1048) statt. Hierdurch sind Vergleiche mit früheren Ergebnissen sowie mit den heute üblichen Eignungs- und Güteprüfungen möglich.

Den eigentlichen Versuchen an den Straßenbaubetonen gingen umfangreiche Untersuchungen an Zuschlagstoffen, Bindemitteln und Frischbetonen voraus.

2. Untersuchung der Versuchsmateriale

Vor Beginn der Hauptuntersuchungen wurden die für die Betonherstellung zur Verfügung stehenden Zuschlaggesteine sowie der Zement auf ihre Eigenschaften untersucht.

2.1 Zuschlaggesteine

Für die Durchführung der Versuche wurden folgende 6 Zuschlaggesteine verwendet:

- a) Rheinkies aus dem Oberrheingebiet bei Karlsruhe in den Körnungen 0 - 3, 3 - 7, 7 - 15 und 15 - 30 mm.
- b) Moränekies aus der Nähe von Heidenheim in Württemberg, aufgeteilt in die Körnungen 7 - 15 und 15 - 30 mm.
- c) Muschelkalk aus Rottenburg am Neckar in den Körnungen 7 - 15 und 15 - 30 mm.
- d) Quarzit aus dem Taunus in den Körnungen 8 - 12, 12 - 30 und 30 - 55 mm.
- e) Granit aus der Nähe von Braunlage im Oberharz in den Körnungen 7 - 15, 15 - 30 und 30 - 60 mm.
- f) Porphyry aus der Nähe von Schriesheim/Bergstraße in den Körnungen 7 - 15 und 15 - 30 mm.

Zu den Gesteinen "c" bis "f" waren aus dem gebrochenen Material jeweils mehrere größere Brocken vorhanden, die aus demselben Bruch stammten wie die Zuschlagstoff-Lieferung.

Soweit dies möglich war, wurden an allen Gesteinen die nachstehenden Untersuchungen vorgenommen:

2.1.1 Sieblinie

Bei allen angelieferten Zuschlagstoffen wurde vor Beginn der Betonierarbeiten und während des Betonierens laufend die Kornzusammensetzung überprüft. Die Untersuchung erfolgte nach DIN 1179 bzw. DIN 4226 auf Sieben mit 0,2, 1, 3, 7, 15, 30, 50 und 70 mm Maschenweite bzw. Lochdurchmesser. Die verfügbaren Zuschlagstoffe entsprachen in ihrer Zusammensetzung den Anfor-

derungen der genannten Normen. Lediglich bei den Porphy-Proben wurden bei beiden Fraktionen etwas zu hohe Anteile an Über- und Unterkorn festgestellt. Im Rahmen der zur Verfügung stehenden Möglichkeiten wurden diese Über- und Unterkornanteile ausgesiebt. Wie in Abschnitt 3 gezeigt wird, weisen die mit Porphyr hergestellten Betone dennoch in ihrer Kornzusammensetzung die größten Abweichungen von den geplanten Sieblinien auf.

2.1.2 Rohdichte und Dichtigkeitsgrad

Die Bestimmung der Rohdichte und des Dichtigkeitsgrades erfolgte bei allen Gesteinen nach DIN 52 102. Die in Tafel 1 zusammengestellten Ergebnisse stellen Mittelwerte aus jeweils 10 Messungen dar, deren Einzelwerte maximal $\pm 6 \%$ vom Mittelwert abweichen.

Tafel 1

	Zuschlagstoff					
	Rhein-kies	Moräne-kies	Muschel-kalk	Quarzit	Granit	Porphyr
Rohdichte g/cm ³	2,52	2,56	2,73	2,63	2,58	2,50
Rein-dichte g/cm ³	2,635	2,640	2,750	2,660	2,590	2,58
Dichtig-keitsgrad	0,956	0,970	0,993	0,989	0,996	0,969

2.1.3 Wasseraufnahme

In Anlehnung an DIN 52 103 wurde die Wasseraufnahme der Gesteine bestimmt. Bei Atmosphärendruck wurden sowohl lufttrockene als auch im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknete Proben bis zur Wassersättigung unter Wasser gelagert. In Tafel 2

ist die Wasseraufnahme der Gesteine in % des Gewichts der lufttrockenen bzw. der bei 105 ° C getrockneten Proben angegeben.

Tafel 2

Wasseraufnahme in Gew.-% des Ausgangsmaterials		Zuschlagstoff					
		Rhein-kies	Moräne-kies	Muschel-kalk	Quarzit	Granit	Porphyry
Ausgangsmaterial	lufttrocken	1,40	1,00	0,12	0,32	1,07	1,25
	getrocknet bei 105°C	1,55	1,23	0,16	0,34	1,29	1,70

2.1.4 Biegezug- und Druckfestigkeit

Zur Prüfung auf Biegezugfestigkeit wurden Prismen mit den Abmessungen 5 · 5 · 20 cm³ aus den Gesteinsbrocken herausgesägt. Die Proben wurden im lufttrockenen Zustand nach DIN 52 112 untersucht. Die Bestimmung der Druckfestigkeit erfolgte nach DIN 52 105 an lufttrockenen Gesteinswürfeln mit 4 cm Kantenlängen. Tafel 3 enthält die Zusammenstellung der Ergebnisse.

Tafel 3

	Probe Nr.	Zuschlagstoff			
		Muschel- kalk	Quarzit	Granit	Porphyry
Biegezug- festigkeit in kp/cm^2	1	138	375	158	197
	2	127	277	135	219
	3	148	291	133	169
	4	139	308	163	214
	5			148	
	Mittel	138	313	147	200
Druckfestigkeit in kp/cm^2	1	1720	3240	1990	2910
	2	1890	2940	2100	2530
	3	1650	2440	1910	2570
	4	2190	2920	1930	2600
	5	1740	2260	1920	2400
	Mittel	1840	2760	1970	2600

Die Ergebnisse sind in Anlage 1 graphisch dargestellt.

2.1.5 Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul der Bruchgesteine wurde an jeweils 3 Prismen mit den Abmessungen $6 \cdot 6 \cdot 30 \text{ cm}^3$ im lufttrockenen Zustand bestimmt. Die Messung der Stauchungen erfolgte sowohl optisch mit dem Martens-Spiegelgerät als auch elektronisch mit induktiven Weggebern. Beide Meßmethoden lieferten sehr gut übereinstimmende Resultate. In Tafel 4 sind die im Druckbereich von $5 - 100 \text{ kp/cm}^2$ ermittelten Ergebnisse zusammengefaßt.

Tafel 4

	Probe Nr.	Zuschlagstoff			
		Muschel- kalk	Quarzit	Granit	Porphy
Elastizitätsmodul in Mp/cm^2	1	675	745	825	610
	2	655	690	865	635
	3	710	680	740	540
	Mittel	680	705	810	595

In Anlage 1 sind diese Ergebnisse graphisch dargestellt.

2.1.6 Verschleißwiderstand

An jeweils drei Proben wurde die Abnutzbarkeit der Gesteine durch Schleifen nach DIN 52 108 untersucht. Die Gesteine wurden sowohl parallel als auch senkrecht zu der erkennbaren Schichtung geschliffen. Tafel 5 enthält eine Zusammenfassung der Ergebnisse.

Tafel 5

	Schleif- richtung	Probe Nr.	Zuschlagstoff			
			Muschel- kalk	Quarzit	Granit	Porphy
Abnutzbar- keit durch Schleifen cm^3 in 50cm^2	parallel zur Schichtung	1	17,80	3,56	7,90	4,66
		2	20,10	3,55	7,30	4,17
		3	19,10	3,86	8,00	3,94
		Mittel	19,00	3,66	7,73	4,26
	senkrecht zur Schichtung	1	17,50	3,39	10,60	3,25
		2	17,50	3,96	9,40	3,86
		3	18,10	3,67	8,80	3,81
		Mittel	17,70	3,67	9,60	3,57

Zusätzlich wurde die Abnutzung der Zuschlagstoffe durch Kollern bestimmt. Hierzu wurden von jedem Material sorgfältig ausgesiebte gewaschene und wieder getrocknete Proben von 5,0 kg der Fraktion 15 - 30 mm in eine Trommel gefüllt. Nach jeweils

3500 Umdrehungen der Trommel wurde der Abrieb als Durchgang durch die Siebe ≤ 7 mm in Gew.-%, bezogen auf das Gewicht der ursprünglichen Probe, bestimmt. Die in Tafel 6 angegebenen Werte sind Mittelwerte aus jeweils 3 Versuchen.

Tafel 6

	Sieb- öffnung mm	Zuschlagstoff					
		Rhein- kies	Moräne- kies	Muschel- kalk	Quarzit	Granit	Porphyry
Durchgang	7	2,0	1,4	0,3	0,6	0,3	0,2
durch die	3	0,6	0,3	0,2	0,2	0,3	0,4
Siebe	1	0,4	0,2	0,1	0,1	1,1	0,5
7 mm (in	0,2	4,3	2,6	7,3	3,5	4,9	3,2
Gew.-%bez.							
auf das							
Ausgangs-							
gewicht	Summe	7,3	4,5	7,9	4,4	6,6	4,3

2.1.7 Kornform

Die Kornform aller verwendeten Gesteine wurde durch Ausmessen der Achsen von jeweils 50 Steinen einer Korngruppe bestimmt. In Tafel 7 werden die Mittelwerte der Seitenverhältnisse (1 : b : d) angegeben, außerdem enthält sie die festgestellten Seitenverhältnisse von besonders flachen sowie besonders gedrunenen Stücken.

Tafel 7

Korn- gruppe	l : b : d	Zuschlagstoff					
		Rheinkies	Moränekies	Muschelkalk	Quarzit	Granit	Porphyrr
15-30	mittel	1:0,70:0,40	1:0,73:0,34	1:0,71:0,43	1:0,63:0,37	1:0,68:0,42	1:0,73:0,47
	flache Stücke	1:0,86:0,24	1:0,74:0,19	1:0,83:0,22	1:0,67:0,20	1:0,58:0,71	1:0,75:0,24
	gedrungene "	1:0,94:0,78	1:0,97:0,83	1:0,91:0,82	1:1,0 :0,93	1:0,86:0,78	1:0,84:0,82
7-15	mittel	1:0,72:0,52	1:0,69:0,36	1:0,67:0,40	1:0,71:0,43	1:0,62:0,35	1:0,69:0,45
	flache Stücke	1:0,91:0,35	1:0,65:0,16	1:0,63:0,19	1:0,83:0,17	1:0,46:0,16	1:0,64:0,19
	gedrungene "	1:0,86:0,82	1:0,95:0,82	1:0,91:0,73	1:0,92:0,89	1:0,70:0,60	1:1,0 :0,94

Auf Anlage 9 und 10 sind einige der verwendeten Zuschlaggesteine abgebildet.

Die Kiese, insbesondere der Moränekies, wiesen glatte und abgeschliffene Oberflächen sowie vorwiegend abgerundete Formen auf. Die gebrochenen Steine dagegen zeigten viele scharfe Ecken und Kanten sowie rauhe Oberflächen. Eine genaue Bestimmung der Oberflächenrauigkeit bzw. des Verhältnisses Gesamtoberfläche zum Volumen der Zuschlagsteine wurde mangels eines geeigneten Meßverfahrens nicht durchgeführt.

2.2 Bindemittel

Als Bindemittel wurde zur Herstellung der Versuchsbetone der für den Straßenbau zugelassene Portlandzement PZ 275, Werk "Alemannia" in Höver/Han., verwendet. Der gesamte Zement entstammte einer Charge.

Die angelieferte Menge wurde in kleinere Portionen aufgeteilt, die für die Dauer der Versuche in luftdicht verschlossenen Gefäßen gelagert wurden. Laufende Kontrollen ergaben, daß der Zement sich während der gesamten Versuchsdauer von ca. 2 Jahren praktisch kaum veränderte.

Beim Betonieren eines jeden Versuchsbetons wurden Zementproben entnommen und damit die nachstehenden Untersuchungen vorgenommen.

2.2.1 Erstarrungszeiten

Die Erstarrungszeiten wurden nach DIN 1164 bestimmt. Als Mittel aus 19 Untersuchungen ergab sich:

Erstarrungsbeginn nach	225 Minuten
Erstarrungsende nach	325 Minuten

Die maximalen Abweichungen von diesen Mittelwerten betrugen beim

Erstarrungsbeginn	± 15 Minuten
Erstarrungsende	- 65 und + 45 Minuten.

2.2.2 Mahlfineinheit

Die Untersuchung der Mahlfineinheit ergab als Mittel aus 15 Versuchen folgende Werte:

Rückstand auf dem Sieb 1,25	DIN 4188	0,0 %
" " " " 0,20	DIN 4188	1,2 %
" " " " 0,09	DIN 4188	8,3 %
" " " " 0,063	DIN 4188	18,4 %

Eine Bestimmung der spezifischen Oberfläche nach Blaine ergab
2618 cm²/g.

2.2.3 Biegezug- und Druckfestigkeit

Die Untersuchung der Biegezug- und Druckfestigkeit erfolgte an Mörtelprismen nach DIN 1164. In Tafel 8 sind die Mittelwerte aus 24 Versuchen angegeben.

Tafel 8

Alter der Proben Tage	Biegezugfestigkeit kp/cm ²	Druckfestigkeit kp/cm ²
7	68	358
28	87	522
56	91	555

3. Herstellung der Versuchsbetone

Ziel der Untersuchungen war, den Einfluß der Kornzusammensetzung und der Art der verwendeten Zuschlaggesteine auf das Verformungsverhalten von Straßenbetonen zu klären. Es wurden daher die in Abschnitt 2 erwähnten 6 verschiedenen Zuschlaggesteine in der Regel in 3 unterschiedlichen Kornzusammensetzungen untersucht. Insgesamt wurden 15 verschiedene Betone hergestellt und geprüft.

Für alle Versuchsbetone wurde als Körnung 0 - 7 mm bzw. 0 - 3 mm einheitlich Rheinsand verwendet.

3.1 Sieblinien

Die Sieblinien der Zuschläge wurden nach Prozenten des Festraumvolumens ermittelt. Es wurden Kornzusammensetzungen gewählt, bei denen der Betonsandanteil

- a) 45 %,
- b) 60 % und für die Ausfallkörnung
- c) ca. 40 %

des Festraumvolumens betrug. Die Sieblinien "a" mit 45 % Sandanteil (0 - 7 mm) sollten an der unteren Grenze, die mit 60 % Sandanteil ("b") etwa im oberen Drittel des "besonders guten" Bereichs liegen, wie er in den "Richtlinien für den Bau von Betonfahrbahnen" vorgeschrieben ist. Die Sieblinien "c" (Ausfallkörnung 3 - 15 mm, Sandanteil 0 - 3 mm etwa 40 %, Zusammensetzung des Sandes wie der Anteil 0 - 3 mm in Reihe "a") wurden nach den Gesetzen der Hohlraumrechnung und nach Eignungsprüfungen aufgebaut.

Die rechnerisch aus den Einzelsieblinien der verschiedenen Zuschlaggesteine zusammengestellten Gesamtsieblinien wurden während des Betonierens laufend überprüft. Die Übereinstimmung der Probesiebungen mit der Rechnung war gut. Um eine möglichst genaue Übereinstimmung der einzelnen Sieblinien zu erreichen, ließen sich geringfügige Schwankungen des Rheinsandanteiles bei den einzelnen Mischungen nicht gänzlich vermeiden.

3.1.1 Sieblinien "a", Rheinsandanteil 45 %

In der nachstehenden Tafel 9 werden die Durchgänge durch die einzelnen Prüfsiebe für die verschiedenen Betonkiessandgemische sowie der prozentuale Rheinsandanteil an der gesamten Zuschlagstoffmenge angegeben.

Tafel 9

Zuschlagstoff 7 mm	Durchgang durch Prüfsieb in %							Rheinsand- anteil in %
	0,2	1,0	3,0	7,0	15,0	30,0	30	
Rheinkies	3	24	30	45	66	100	100	45
Moränekies	3	23	30	45	66	100	100	46
Muschelkalk	3	23	30	45	65	99	100	46
Quarzit	3	23	30	45	66	99	100	45
Granit	3	22	29	45	65	100	100	44
Porphyr	2	19	25	49	70	100	100	40

3.1.2 Sieblinien "b", Rheinsandanteil 60 %

Tafel 10

Zuschlagstoff 7 mm	Durchgang durch Prüfsieb in %							Rheinsand- anteil in %
	0,2	1,0	3,0	7,0	15,0	30,0	30	
Rheinkies	4	31	40	59	75	100	100	59
Moränekies	4	30	40	60	75	99	100	62
Muschelkalk	4	30	40	60	75	100	100	62
Quarzit	4	30	40	59	75	99	100	62
Granit	4	30	40	59	76	100	100	59
Porphyr	4	30	40	61	83	99	100	52

3.1.3 Sieblinien "c", Ausfallkörnungen

Tafel 11

Zuschlagstoff 15 mm	Durchgang durch Prüfsieb in %								Rheinsand- anteil in %
	0,2	1,0	3,0	7,0	15,0	30,0	50,0	50	
Quarzit	4	29	38	40	48	75	100	100	40
Granit	4	29	38	40	48	79	98	100	40
Porphyry	4	28	38	42	50	82	100	100	38

Aufgrund der bei den verfügbaren Zuschlagstoffen vorhandenen Anteile an Über- und Unterkorn konnte ein völliger Ausfall der Körnung 3 - 15 mm bei den Kornzusammensetzungen nach Sieblinie "c" nicht erzielt werden.

Die Tafeln 9 - 11 zeigen eine gute Übereinstimmung der zusammengehörigen Sieblinien. Lediglich die Mischungen mit Porphyry als grobem Zuschlagstoffanteil weisen spürbare Abweichungen von den geplanten Sieblinien auf.

In Anlage 2 sind die Kornzusammensetzungen der 3 Versuchsreihen graphisch dargestellt.

3.2 Zementleimdosierung

Der Frischbeton wurde so zusammengesetzt, daß der Wasser-Zement-Faktor bei allen Betonen $w = 0,45$ betrug. Um den spezifischen Einfluß der groben Zuschlaggesteine auf die Formänderungen und Festigkeiten des Betons zu erfassen, wurde die Zementleimmenge in den jeweiligen Versuchsreihen konstant gehalten. Sie wurde so gewählt, daß für alle Betone eine etwa gleichmäßig gute Verarbeitbarkeit gewährleistet war.

Tafel 13 enthält eine Zusammenstellung der bei den einzelnen Versuchsreihen pro Kubikmeter Beton zugegebenen Zement- und Wassermengen.

Tafel 13

Versuchsreihe		Zement kg/m ³	Wasser l/m ³	W/Z
Sieblinie "a", anteil 45 %	Rheinsand-	355	160	0,45
Sieblinie "b", anteil 60 %	Rheinsand-	378	170	0,45
Sieblinie "c", Ausfallkörnung		355	160	0,45

3.3 Frischbeton-Eigenschaften

Sämtliche Versuchsbetone wurden in einem Zwangsmischer hergestellt. Die Mischdauer betrug jeweils 3 Minuten nach der Wasserzugabe. Die Verdichtung der Probekörper erfolgte durch Rütteln auf einem Rütteltisch ohne Auflast. Die Rütteldauer betrug jeweils 60 Sekunden. Hierdurch wurde eine praktisch vollständige Verdichtung bei allen Betonen erzielt.

Von sämtlichen Mischungen wurden das Eindringmaß nach DIN 1048 sowie das Raumgewicht bestimmt. Außerdem wurde mit dem Luftgehaltsmesser der Tonindustrie der Luftporengehalt der Betone nach ihrer vollständigen Verdichtung ermittelt. Tafel 14 enthält eine Zusammenstellung der Ergebnisse.

Tafel 14

3.3.1 Rheinsandanteil der Betone 45 %

	Zuschlagstoff > 7 mm					
	Rheinkies	Moränekies	Muschelkalk	Quarzit	Granit	Porphyr
Eindringmaß cm	2,3	4,2	2,2	1,2	1,5	1,4
Frischraumgewicht kp/m^3	2425	2430	2485	2430	2400	2375
Luftporengehalt %	1,7	1,7	1,5	1,9	1,9	1,3

3.3.2 Rheinsandanteil der Betone 60 %

Eindringmaß cm	2,9	3,4	2,2	2,2	1,5	1,8
Frischraumgewicht kp/m^3	2395	2400	2430	2390	2370	2395
Luftporengehalt %	2,1	2,4	2,7	2,5	2,7	2,3

3.3.3 Betone mit Ausfallkörnungen

Eindringmaß cm				2,6	1,9	2,3
Frischraumgewicht kp/m^3				2410	2385	2355
Luftporengehalt %				2,0	2,3	2,1

Die für den Luftporengehalt ermittelten Werte lassen den Schluß zu, daß die Betone gleicher Kornzusammensetzung annähernd gleichmäßig verdichtet wurden.

4. Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse

Im Hinblick auf die Verhältnisse im Betonstraßenbau erschien es zweckmäßig, für die Untersuchung des Verformungsverhaltens der Betone einen Probekörper auszuwählen, dessen Höhe etwa der Dicke einer üblichen Fahrbahnplatte entspricht. Für die Hauptversuche bot sich daher der für internationale Vergleichsuntersuchungen vorgeschlagene Standardprobekörper mit den Abmessungen $20 \cdot 20 \cdot 90 \text{ cm}^3$ an [5]. Es wurden z. T. Betonmischungen mit einem Größtkorn bis zu ca. 50 mm untersucht. Das Verhältnis von kleinster Prüfkörperabmessung zum Größtkorn-Durchmesser betrug somit mindestens 4 : 1. Dieses Verhältnis erschien aufgrund vorliegender Versuchsergebnisse hinreichend, um ungestörte Versuchsergebnisse zu erzielen.

Die Herstellungsweise von Fahrbahnplatten bringt es mit sich, daß das Anmachwasser fast ausschließlich in einer Richtung aus dem Beton entweichen kann; eine Verdunstung findet i. a. nur an der Fahrbahnoberfläche statt. Die hierbei in den Platten entstehenden Schwindspannungen wirken sich auf die Biegezugfestigkeit und u. U. auf die Dehnbarkeit des Betons aus. Durch geeignete Behandlung der Probekörper mit wasserdampfdichten Anstrichmitteln sollten im Versuch ähnliche Verdunstungs- und Schwindvorgänge wie im Straßenbau erzielt werden. Auf diese Weise sollten die je nach Zuschlag, Gefüge und Größtkorn unterschiedlichen Schwindeinflüsse auf das Dehnungs- und Bruchverhalten ermittelt werden.

Um Vergleiche mit den heute üblichen Güte- und Eignungsprüfungen anstellen zu können, wurden in Anlehnung an die deutschen Richtlinien für die Prüfungen von Betonen zusätzlich zu den Hauptversuchen Untersuchungen an genormten Probekörpern durchgeführt.

4.1 Probekörper und Prüfungen

Die Bestimmung der Druck-, Biegezug- und Spaltzugfestigkeit sowie des elastischen Verhaltens der Betone erfolgte an verschiedenen Probekörpern und unter unterschiedlichen Bedingungen, die als Übersicht in Tafel 15 zusammengestellt sind.

Tafel 15

Nr.	Probekörper	Lager.	Prüftermine Alter in Tagen				Prüfungen
1	Würfel 20·20·20	W	7	-	28	56	Druckfestigkeit nach DIN 1048
2	Balken 15·10·70	W	7	-	28	56	Biegezugfestigkeit nach DIN 1048
3	Balken 15·15·70	W	7	14	28	56	Biegezugfestigkeit nach DIN 1048, Neu- entwurf
4	Zylinder 15/30	W L	7	14	28	56 28 56	Spaltzugfestigkeit nach DIN 1048, Neuentwurf
5	Balken 20·20·90	W L	14	28	56 28 56		E-Modul, Bruchdeh- nungen, Biegezug- festigkeit

4.2 Lagerung der Probekörper

Wie aus Tafel 15 hervorgeht, wurden die Probekörper auf zwei unterschiedliche Arten bis zum Prüftermin gelagert.

Lagerung W: Die Proben lagen nach dem Betonieren 24 Stunden (Balken 48 Stunden) in der Schalung unter feuchten Tüchern. Um für alle Prüfkörper gleiche Lagerungsbedingungen zu schaffen, wurden die Proben bis 1 Stunde vor dem Prüftermin unter Wasser von 18 - 20 ° C gelagert.

Lagerung L: Die Proben wurden bis einschließlich des 14. Tages wie unter "W" beschrieben gelagert. Nach dem 14. Tag kamen die Prüfkörper sodann in einen Klimaraum mit $18 - 20^{\circ} \text{C}$ und 60 % relativer Luftfeuchtigkeit. Die Balken $20 \cdot 20 \cdot 90$ erhielten sofort nach dem Herausnehmen aus dem Wasser an 5 Seiten einen Überzug mit einem nahezu wasser- und wasserdampfdichten Anstrichmittel. Die Herstellungsunterseite, die während der Biegezugversuche in der Zugzone liegen sollte, wurde nicht gestrichen.

Um einen möglichst dichten Anstrich zu verwenden, waren zuvor umfangreiche Vorversuche mit einer Reihe von handelsüblichen Bitumen-, Teerpech- und Kunstharzlösungen sowie Kunstharz- und Steinkohlenteeremulsionen durchgeführt worden. Sie ergaben - in guter Übereinstimmung mit aus der Literatur[4] bekannten Versuchsergebnissen -, daß eine Zweikomponenten-Kunstharzlösung den relativ besten Schutz gegen eine allseitige Verdunstung des in den Betonkörpern enthaltenen Wassers bildete. Eine absolut dampfdichte Sperre ließ sich - erwartungsgemäß - mit keinem der untersuchten Anstriche herstellen. Doch erschien dies im Hinblick auf die in einer Betonfahrbahnplatte herrschenden Verhältnisse auch nicht nötig. Bei den Vorversuchen entwichen aus den mit dem gewählten Reaktionskunstharz völlig angestrichenen Betonproben nur ca. 20 % der Feuchtigkeitsmenge, die aus gleichartigen unbehandelten Proben verdunstete. Dieser Unterschied im Verdunstungsverhalten von unbehandelten und behandelten Betonflächen erschien für das vorliegende Versuchsprogramm hinreichend.

Um Biegezugbeanspruchungen infolge Eigengewicht zu vermeiden, wurden sämtliche Balken stehend gelagert.

Die Geschwindigkeit, mit der ein frischer Beton an der Luft austrocknet, beeinflußt die Entstehung von Schwindspannungen in den Probekörpern nicht unwesentlich. Hieraus resultieren Einflüsse

auf die Verformungseigenschaften sowie auf die Biegezug- und Spaltzugfestigkeiten der Proben. Dennoch wurde aus zwei Gründen davon Abstand genommen, die Austrocknungsgeschwindigkeit der luftgelagerten Proben zu bestimmen: Wie aus Tafel 2 hervorgeht, war die Wasseraufnahme der verwendeten Zuschlaggesteine gering, sie betrug maximal 1,4 %. Die Austrocknungsgeschwindigkeit der Betone hing daher im wesentlichen vom Abbinde- und Austrocknungsverhalten des Zementleims ab. Da für alle Betone der gleiche Zementleim verwendet worden war, wären die zu erwartenden Unterschiede im Austrocknungsverhalten ohnehin gering gewesen. Darüberhinaus hätten die ständigen Gewichtskontrollen die Gefahr mit sich gebracht, daß die Biegezugfestigkeiten beim häufigen Transportieren der Proben beeinträchtigt worden wären.

4.3 Untersuchung der Probekörper, Zusatzversuche

4.3.1 Würfel $20 \cdot 20 \cdot 20 \text{ cm}^3$

An den Würfeln wurde die Druckfestigkeit der Betone nach DIN 1048 festgestellt. Abweichend von DIN 1048 lagerten die Würfel bis ca. 1 Stunde vor der Prüfung unter Wasser. Tafel 16 enthält eine Zusammenstellung der Ergebnisse.

Tafel 16

Druckfestigkeit R_d der Betone in kp/cm^2

4.3.1.1 Rheinsandanteil der Betone: 45 %

Alter der Proben in Tagen	Probe Nr.	Zuschlagstoff > 7 mm					
		Rhein-kies	Moräne-kies	Muschel-kalk	Quarzit	Granit	Porphyr
7	1	553	478	538	555	535	483
	2	550	550	493	478	555	530
	3	560	513	505	595	495	495
	4	600	525	530	565	522	485
	Mittel	563	517	517	548	525	511
28	1	638	580	656	553	651	666
	2	673	633	625	553	626	641
	3	628	550	635	628	644	656
	4	678	635	638	648	634	621
	Mittel	654	599	639	596	639	646
56	1	650	648	688	600	742	728
	2	653	613	653	618	722	658
	3	721	648	653	633	652	673
	4			708		715	673
	Mittel	675	636	676	617	708	683

4.3.1.2 Rheinsandanteil der Betone: 60 %

7	1	533	443	369	508	502	513
	2	555	483	374	543	473	518
	3	530	493	421	498	522	543
	4	473	500	384	558	473	538
	Mittel	518	480	387	527	493	528
28	1	618	558	458	598	641	585
	2	613	610	476	648	634	510
	3	648	573	458	555	586	565
	4	658	510		623	554	545
	Mittel	634	563	464	606	604	551
56	1	638	585	533	683	621	616
	2	635	580	493	668	666	609
	3	655	563	523	681	641	601
	4			498		746	671
	Mittel	643	576	512	677	668	624

Fortsetzung Tafel 16

4.3.1.3 Betone mit Ausfallkörnungen

Alter der Proben in Tagen	Probe Nr.	Zuschlagstoff > 7 mm		
		Quarzit	Granit	Porphyr
7	1	476	537	440
	2	530	520	521
	3	505	512	475
	4	495	485	497
	Mittel	500	514	484
28	1	510	666	592
	2	618	601	601
	3	503	596	625
	4	528	654	609
	Mittel	539	629	608
56	1	626	661	618
	2	542	671	645
	3	614	726	596
	4	614	656	628
	Mittel	599	654	622

Eine graphische Darstellung der Versuchsergebnisse zeigt Anlage 3.

Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, daß die Druckfestigkeiten der Betone mit 60 % Rheinsandanteil sowie der Betone mit Ausfallkörnungen insgesamt etwas niedriger sind als die der Betone mit 45 % Rheinsandanteil. Die Differenzen betragen zwischen 4 % und 10 %. Ausnahmen bilden lediglich der Muschelkalkbeton, dessen Druckfestigkeit um 25 % abnahm, sowie der Quarzitbeton, dessen Festigkeit bei größerem Rheinsandgehalt um 10 % zunahm.

Die Unterschiede innerhalb der einzelnen Versuchsreihen mit Betonen gleicher Kornzusammensetzung sind relativ gering, eine Tendenz - wie etwa eine Zunahme der Betondruckfestigkeit ent-

sprechend der Festigkeit der verwendeten Zuschlaggesteine -
läßt sich nicht erkennen.

4.3.2 Balken 15 · 10 · 70 cm³

Die Prüfung der Balken erfolgte nach DIN 1048. Die Herstellungs-
unterseite der Proben lag beim Biegeversuch in der Zugzone. Die
Ergebnisse sind in Tafel 17 zusammengestellt.

Tafel 17

Biegezugfestigkeit $\beta_{bz,10}$ der Betone in kp/cm²

4.3.2.1 Rheinsandanteil der Betone: 45 %

Alter der Proben in Tagen	Probe Nr.	Zuschlagstoff > 7mm					
		Rhein- kies	Moräne- kies	Muschel- kalk	Quarzit	Granit	Porphyry
7	1	61	55	64	61	66	61
	2	62	60	62	61	70	64
	3	65	69	61	62	64	58
	Mittel	63	61	62	61	67	61
28	1	75	70	69	69	66	64
	2	71	68	66	66	70	71
	3	63	66	74	64	72	73
	Mittel	70	68	70	66	69	69
56	1	73	69	70	68	81	74
	2	66	65	73	65	79	73
	3	71	70	75	63	74	72
	Mittel	70	68	73	65	78	73

Fortsetzung Tafel 17

4.3.2.2 Rheinsandanteil der Betone: 60 %

7	1	57	61	55	62	64	57
	2	57	67	61	63	69	63
	3	58	58	57	68	70	65
	Mittel	57	62	58	64	68	62
28	1	64	70	64	71	74	72
	2	59	64	60	76	69	74
	3	62	68	59	72	74	69
	Mittel	62	67	61	73	72	71
56	1	65	72	62	73	71	71
	2	68	71	64	79	74	70
	3	63	70	78	74	71	73
	Mittel	65	71	68	75	72	71

4.3.2.3 Betone mit Ausfallkörnungen

Alter der Proben in Tagen	Probe Nr.	Zuschlagstoff > 7 mm		
		Quarzit	Granit	Porphyr
7	1	55	55	61
	2	61	61	57
	3	64	58	59
	Mittel	60	58	59
28	1	65	66	70
	2	74	62	62
	3	58	63	63
	Mittel	66	64	65
56	1	71	71	80
	2	83	72	69
	3	72	70	73
	Mittel	75	71	74

Anlage 4 gibt eine graphische Darstellung der Versuchsergebnisse.

Die Festigkeitsunterschiede sind relativ gering, sie betragen maximal 10 kp/cm^2 ; z. B. liegen die 56-Tage-Werte alle nahe bei 70 kp/cm^2 . Der Einfluß der Art der groben Zuschläge und der Kornzusammensetzung auf die Biegezugfestigkeit von Betonbalken $15 \cdot 10 \cdot 70 \text{ cm}^3$ scheint daher von geringer Bedeutung zu sein.

4.3.3 Balken $15 \cdot 15 \cdot 70 \text{ cm}^3$

Die Prüfung der Balken auf Biegezugfestigkeit erfolgte in Anlehnung an die Neufassung der DIN 1048. Die Herstellungsebene lag beim Biegeversuch in der Zugzone. Die Stützweite betrug $60,0 \text{ cm}$. Die Belastung erfolgte durch 2 Einzelasten in den Drittelpunkten.

Der Lastabstand a vom Auflager betrug demnach 20 cm . Daraus ergab sich ein Verhältnis $a/h = 20/15 = 1,33$.

In Tafel 18 wurden die erzielten Ergebnisse zusammengestellt.

Tafel 18 s. S. 26

Tafel 18

Biegezugfestigkeit $\beta_{bz,15}$ der Betone in kp/cm^2

4.3.3.1 Rheinsandanteil der Betone: 45 %

Alter der Proben in Tagen	Probe Nr.	Zuschlagstoff > 7 mm					
		Rhein-kies	Moräne-kies	Muschel-kalk	Quarzit	Granit	Porphyr
7	1	48	32	53	51	53	55
	2	54	38	52	54	54	50
	Mittel	51	35	53	53	54	53
14	1	54	53	55	52	60	54
	2	50	53	51	56	56	59
	Mittel	52	53	53	54	58	57
28	1	56	57	57	59	63	65
	2	53	58	59	63	64	56
	3	52	55	52	51	61	63
	Mittel	54	57	56	58	63	61
56	1	58	55	61	57	70	61
	2	52	59	70	54	72	54
	3			64	59	64	60
	Mittel	55	57	65	57	68	59

4.3.3.2 Rheinsandanteil der Betone: 60 %

7	1	49	53	55	53	54	54
	2	52	47	57	58	56	49
	Mittel	51	50	56	56	55	52
14	1	54	50	52	56	57	52
	2	56	50	55	59	55	60
	Mittel	55	50	54	58	56	56
28	1	55	52	63	56	61	57
	2	56	51	60	58	55	58
	3	58	57	59	58	61	62
	Mittel	56	53	61	57	59	59
56	1	56	54	64	62	64	58
	2	54	56	69	60	60	61
	3	57	54	66	66	62	60
	Mittel	56	55	66	63	62	60

Fortsetzung Tafel 18

4.3.3.3 Betone mit Ausfallkörnungen

Alter der Proben in Tagen	Probe Nr.	Zuschlagstoff > 7 mm		
		Quarzit	Granit	Porphyrt
7	1	45	50	50
	2	49	51	53
	Mittel	47	51	52
14	1	55	56	57
	2	51	56	52
	Mittel	53	56	55
28	1	55	56	57
	2	58	61	57
	3	54	57	60
	Mittel	56	58	58
56	1	57	62	52
	2	62	52	60
	3	72	57	63
	Mittel	64	57	58

Die Ergebnisse sind in Anlage 5 graphisch dargestellt.

Auch bei diesen Probekörpern lassen sich keine augenfälligen Unterschiede in der Biegezugfestigkeit der untersuchten Betone feststellen. Gegenüber den Ergebnissen am Balken 15 · 10 · 70 cm³ ist bei den größeren Balken allgemein ein scheinbarer Rückgang der Biegezugfestigkeit um etwa 10 - 13 % zu verzeichnen. Es stellt dies jedoch nur eine erneute Bestätigung des bereits bekannten Sachverhaltes dar, daß in den Drittelpunkten belastete Betonbalken i. a. niedrigere Biegezugfestigkeiten ergeben als Balken mit einer Einzellast in der Mitte der Stützweite.

4.3.4 Zylinder 15/30

In den Entwurf der Neufassung von DIN 1048 wurde die Prüfung von Betonzylindern auf ihre Spaltzugfestigkeit aufgenommen. Die untersuchten Betone wurden dieser Untersuchung unterzogen. Die Ergebnisse enthält Tafel 19.

Tafel 19

Spaltzugfestigkeit β_{sp} der Betone in kp/cm^2

4.3.4.1 Rheinsandanteil der Betone: 45 %

Lager. d.Pr.	Alter der Proben in Tagen	Probe Nr.	Zuschlagstoff > 7 mm					
			Rhein- kies	Moräne- kies	Muschel- kalk	Quarzit	Granit	Porphyry
W	7	1	34	39	36	35	40	30
		2	36	31	29	30	32	37
		Mittel	35	35	33	33	36	34
	14	1	36	48	33	37	44	42
		2	32	53	33	35	34	45
		Mittel	34	51	33	36	39	44
	28	1	42	41	47	43	44	36
		2	45	40	60	43	47	39
		Mittel	44	41	53	43	46	38
	56	1	39	35	52	44	45	42
		2	47	42	44	46	47	46
		Mittel	43	39	48	45	46	44
L	28	1	33	36	54	41	42	40
		2	42	35	41	45	44	42
		Mittel	38	36	47	43	43	41
	56	1	37	38	38	43	46	37
		2	35	42	38	42	40	36
		Mittel	36	40	38	43	43	37

Fortsetzung Tafel 19

4.3.4.2 Rheinsandanteil der Betone: 60 %

Lager. d. Pr.	Alter der Proben in Tagen	Probe Nr.	Zuschlagstoff > 7 mm					
			Rhein- kies	Moräne- kies	Muschel- kalk	Quarzit	Granit	Porphyrr
W	7	1	32	35	30	38	43	32
		2	36	38	29	34	35	44
		Mittel	34	37	30	36	39	38
	14	1	35	38	34	40	38	30
		2	36	41	34	39	38	36
		Mittel	36	40	34	40	38	33
	28	1	33	41	39	49	47	41
		2	36	39	33	41	45	40
		Mittel	35	40	36	45	46	41
	56	1	40	44	29	42	38	50
		2	36	35	38	43	46	41
		Mittel	38	40	34	43	42	46
L	28	1	33	37	29	45	40	42
		2	37	31	37	34	38	38
		Mittel	35	34	33	40	39	40
	56	1	34	31	30	32	42	35
		2	40	39	37	48	42	47
		Mittel	37	35	34	40	42	41

Fortsetzung Tafel 19

4.3.4.3 Betone mit Ausfallkörnungen

Lagerung der Proben	Alter der Proben in Tagen	Probe Nr.	Zuschlagstoff > 7 mm		
			Quarzit	Granit	Porphyr
W	7	1	33	41	29
		2	31	38	41
		Mittel	32	40	35
	14	1	32	46	38
		2	37	34	40
		Mittel	34	40	39
	28	1	45	35	32
		2	36	34	46
		Mittel	41	35	39
	56	1	46	33	34
		2	40	42	46
		Mittel	43	38	40
L	28	1	40	37	31
		2	49	42	45
		Mittel	45	40	38
	56	1	45	39	39
		2	47	35	47
		Mittel	46	37	43

Die Versuchsergebnisse weisen - insbesondere bei den Betonen mit hohen Grobkornanteilen - verschiedentlich erhebliche Streuungen auf. Eine einheitliche Tendenz ist daher nur schwer zu erkennen. Insgesamt scheint die Spaltzugfestigkeit der mit gebrochenen Grobzuschlägen hergestellten Betone etwas höher zu sein als die Spaltzugfestigkeiten der reinen Kiesbetone. Der Einfluß der Luftlagerung auf die Spaltzugfestigkeit aller untersuchten Betone ist nicht so hoch wie auf die Biegezugfestigkeiten, die durch Schwindspannungen infolge Austrocknung

der Proben stärker herabgesetzt wurden. Der Quotient Biegezugfestigkeit $R_{bz,20}/R_{sp}$ ist daher für wassergelagerte Proben deutlich größer als für luftgelagerte Proben.

4.4 Hauptversuche an Balken $20 \cdot 20 \cdot 90 \text{ cm}^3$

Die Hauptversuche wurden aus den eingangs erwähnten Gründen an großen Probekörpern $20 \cdot 20 \cdot 90 \text{ cm}^3$ durchgeführt. Diese Balken wurden sowohl im lufttrockenen (Lagerung "L") als auch im nahezu wassersatten (Lagerung "W") Zustand geprüft. An den lufttrockenen, durch besondere Anstriche speziellen, dem Verdunstungsvorgang in Betonfahrbahnplatten angeglichenen, Austrocknungsvorgängen unterworfenen Proben sollten die Schwindinflüsse auf die Biegezugfestigkeiten und auf das Verformungsverhalten der Betone studiert werden.

Bei den Proben der Lagerungsart "W" ließ es sich versuchstechnisch nicht völlig ausschließen, daß sie kurz vor der Prüfung gewissen Schwindvorgängen ausgesetzt wurden. Ca. 1 Stunde vor der Prüfung mußten sie aus dem Wasserbad genommen werden, um Meßmarken und andere Versuchseinrichtungen anzubringen. Hierbei begannen sie, an der Oberfläche bereits leicht auszutrocknen.

An den Balken $20 \cdot 20 \cdot 90 \text{ cm}^3$ wurden die Dehnungen, der E-Modul, die Biegezugfestigkeit und die Bruchdehnungen der Betone ermittelt.

4.4.1 Biegezugfestigkeit

Die Prüfung der Biegezugfestigkeit der Balken erfolgte in Anlehnung an die Vereinbarungen zur Gewinnung international vergleichbarer Versuchsergebnisse an Betonen. Die Herstellung,unterseite der Balken lag beim Biegeversuch in der Zugzone. Die Stützweite des statisch bestimmt gelagerten Balkens betrug 80,0 cm. Als Belastung wirkten zwei Einzellasten in den Drittelpunkten. Der Lastabstand von den Auflagern betrug $80/3 = 26,7 \text{ cm}$. Das Verhältnis zwischen Lastabstand a und Balkenhöhe h ergab sich somit zu $a : h = 80,0 : (3 \cdot 20,0) = 1,33$. Es lag somit das gleiche Verhältnis $a : h$ wie bei den Balken $15 \cdot 15 \cdot 70 \text{ cm}^3$ vor.

Die Last wurde mit Hilfe einer 10-Mp-Öldruckpresse in Stufen von jeweils 500 kp aufgebracht, wobei die Laststeigerung so vorgenommen wurde, daß die Biegezugbeanspruchung in der Probe in einer Minute um $\Delta\sigma_{bz} = 15 \text{ kp/cm}^2$ zunahm. Nach jeder Laststufe wurde die Last für 15 Sekunden konstant gehalten; in dieser Zeit wurden die Dehnungsmeßgeräte abgelesen (s. 4.4.2). Sodann wurde vollkommen entlastet. Nach einer Pause von wiederum 15 Sekunden wurde die nächste Laststufe aufgebracht. Die Lastspiele wurden fortgesetzt, bis der Bruch eintrat.

Die Bilder der Anlagen 11 und 12 geben einen Überblick über die benutzte Versuchseinrichtung. Der besseren Deutlichkeit halber wurden für die Dauer der Aufnahmen einige Vorrichtungen entfernt, die zum Schutz der Dehnungsmeßeinrichtung bei Eintreten des Biegebruches dienten.

In Tafel 20 wurden die an den Prüfkörpern ermittelten Biegezugspannungen zusammengefaßt.

Tafel 20 s. S. 33 ff.

Tafel 20

Biegezugfestigkeit $B_{bz,20}$ der Betone in kp/cm^2

4.4.1.1 Rheinsandanteil der Betone: 45 %

Lager. d. Pr.	Alter der Proben in Tagen	Probe Nr.	Zuschlagstoffkörnung 7 - 30 mm					
			Rhein- kies	Moräne- kies	Muschel- kalk	Quarzit	Granit	Porphyry
W	14	1	51	49	57	56	52	46
		2	53	54	52	57	55	48
		Mittel	52	52	55	57	54	47
	28	1	59	54	60	58	57	47
		2	58	53	63	57	59	51
		Mittel	59	54	62	58	58	49
	56	1	56	58	57	56	62	56
		2	63	58	59	60	66	58
		Mittel	59	58	58	58	64	57
L	28	1	38	44	48	56	46	49
		2	47	39	49	49	46	49
		3	43	42	52	57	47	48
		4	39	39	46	53	45	45
		Mittel	42	41	49	54	46	48
	56	1	36	39	40	50	44	45
		2	43	42	43	48	47	44
		3	39	35	42	48	44	43
		4	37	37	45	41	43	38
		Mittel	39	38	43	47	45	43

Fortsetzung Tafel 20

4.4.1.2 Rheinsandanteil der Betone: 60 %

Lager. d. Pr.	Alter der Proben in Tagen	Probe Nr.	Zuschlagstoffkörnung 7 - 30 mm					
			Rhein- kies	Moräne- kies	Muschel- kalk	Quarzit	Granit	Porphyry
W	14	1	52	59	60	63	56	51
		2	54	59	61	62	57	52
		Mittel	53	59	61	63	57	52
	28	1	55	57	58	62	61	49
		2	56	59	63	64	59	55
		Mittel	56	58	61	63	60	52
	56	1	62	61	62	62	66	56
		2	60	55	58	61	69	53
		Mittel	61	58	60	62	68	55
L	28	1	44	35	48	56	41	50
		2	47	44	49	52	44	49
		3	44	40	49	49	43	45
		4	42	44	47	48	45	46
		Mittel	44	41	48	52	43	48
	56	1	39	43	43	49	42	44
		2	43	41	44	44	42	51
		3	42	42	43	49	40	46
		4	36	42	48	48	47	51
		Mittel	40	42	45	48	43	48

Fortsetzung Tafel 20

4.4.1.3 Betone mit Ausfallkörnungen

Lagerung der Proben	Alter der Proben in Tagen	Probe Nr.	Zuschlagstoff > 7 mm		
			Quarzit	Granit	Porphyr
W	14	1	48	48	45
		2	48	41	49
		Mittel	48	45	47
	28	1	59	56	54
		2		53	53
		Mittel	59	55	54
	56	1	64	57	55
		2	61	58	58
		Mittel	63	58	57
L	28	1	47	48	48
		2	48	42	54
		3	43	42	50
		4	44	44	56
		Mittel	46	44	52
	56	1	41	43	43
		2	45	43	49
		3	43	39	48
		4	44	42	43
		Mittel	43	42	46

In Anlage 6 sind die Ergebnisse graphisch dargestellt.

Die an den wassergelagerten Balken $20 \cdot 20 \cdot 90 \text{ cm}^3$ erzielten Biegezugfestigkeiten unterscheiden sich nur unwesentlich von den Balken mit den Abmessungen $15 \cdot 15 \cdot 70 \text{ cm}^3$ gemessenen Werten. Augenfällige Unterschiede zwischen den Ergebnissen der einzelnen Betonarten sind bei den wassergelagerten Proben nicht zu verzeichnen. Insgesamt liegen die Biegezugfestigkeiten der Betone mit höherem Rheinsandanteil etwa 4 % über denen der Betone mit geringerem Feinkornanteil oder Ausfallkörnung; bei den Anfangsfestigkeiten ist dieser Unterschied etwas größer.

Bei den Balken mit der Lagerung "L" (14 Tage Wasserlagerung, danach Austrocknung an der Luft) führten die Schwindeinflüsse zu erheblichen Minderungen der Biegezugfestigkeit. Die Festigkeiten der an der Luft getrockneten Balken lagen im Alter von 28 Tagen im Mittel etwa 15 % und im Alter von 56 Tagen im Mittel etwa 25 % unter den Bruchspannungen der wassergelagerten Proben. Dies bedeutet, daß die Festigkeiten dieser Proben unter den nach 14 Tagen Wasserlagerung erzielten Werten liegen.

Die relativen Festigkeitsminderungen sind bei den mit Rheinkies und Moränekies als Grobzuschlag hergestellten Betonen mit 45 % Feinanteil (0 - 7 mm), Sieblinie "a", am ausgeprägtesten, sie betragen im Alter von 56 Tagen 34 % gegenüber den an wassergelagerten Proben erzielten Werten. Bei den gebrochenen Gesteinen ergaben sich etwas günstigere Verhältnisse. Im einzelnen wurden bei den Betonen mit den genannten groben Zuschlägen folgende Abminderungen ermittelt:

Rheinkies	- 34 %,	Quarzit	- 19 %,
Moränekies	- 34 %,	Granit	- 30 %,
Muschelkalk	- 26 %,	Porphyry	- 25 %.

Die an der Luft gelagerten Proben der Betone mit 60 % Feinanteil (Sieblinie "b") wiesen gegenüber den wassergelagerten im Alter von 56 Tagen die nachstehenden Abminderungen auf:

Rheinkies	- 34 %,	Quarzit	- 23 %,
Moränekies	- 28 %,	Granit	- 37 %,
Muschelkalk	- 25 %,	Porphyry	- 13 %.

Bei den Betonen mit Ausfallkörnung (Sieblinie "c") ergaben sich folgende Werte:

Quarzit	- 32 %,
Granit	- 28 %,
Porphyry	- 19 %.

In Anlage 6 a. und 6 b wurden die Biegezugfestigkeiten B_{bz} der Betone den Elastizitätsmoduln der Zuschlagstoffe E_s zugeordnet. Die Kurvenverläufe sind recht unregelmäßig, so daß sich Gesetzmäßigkeiten nicht ohne weiteres abzeichnen. Insgesamt überwiegt der Eindruck, daß die Abminderung der Biegezugfestigkeiten luftgelagerter Proben umso größer zu sein scheint, je höher der E-Modul der groben Zuschlagstoffe ist.

Die verhältnismäßig starken Abminderungen der Biegezugfestigkeiten luftgelagerter Kiesbetone lassen sich aufgrund der relativ schlechten Haftung des Zementleims an den glatten Kieselsteinen erklären. Die Verbindung des Feinmörtels mit den rauen Oberflächen der gebrochenen Gesteine ist demgegenüber besser.

Die Bruchbilder der mit Rheinkies und Moränekies hergestellten Probekörpern unterschieden sich deutlich von denen, deren grobe Kornanteile aus gebrochenen Gesteinen bestanden. Die groben Kieselsteine hatten sich überwiegend aus dem umgebenden Zementleim und Feinmörtel unbeschädigt herausgelöst. Dagegen verlief der Bruch bei den mit Splitt als Probekörperzuschlag betonierten Proben in der Regel auch durch die groben Zuschlagsteile. Nur vereinzelt löste sich hier ein Zuschlagkorn aus dem umgebenden Gefüge heraus. Die Bilder der Anlagen 13, 14, 15 und 16 geben hiervon einen Eindruck.

4.4.2 Dehnungen und Elastizitätsmodul

Während der im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Belastungsintervalle wurden an der Zugseite der Probekörpern die Verformungen des Betons gemessen. Die Messung erfolgte mit Hilfe von induktiven Weg-Gebern und elektronischen Meßbrücken: Im Bereich des konstanten Biegemoments zwischen den beiden Lasteintragungsstellen waren zwei unabhängig voneinander arbeitende Weg-Geber angebracht worden. Die Messungen beider Geräte stimmten i. a. sehr gut überein, sie wurden automatisch von Linienschreibern registriert. Aus Anlage 11 und 12 gehen nähere Einzelheiten der Versuchseinrichtung und des Versuchsaufbaues hervor.

Aus den an den Probekörpern bei Biegebeanspruchung gemessenen Dehnungen wurden die E-Moduli der Betone E_B errechnet. Hierbei wurde vorausgesetzt, daß die Spannungsverteilung im Probekörper bis zum Bruch linear verläuft und daß die Querschnitte eben bleiben.

Die gemessenen Dehnungen und die daraus errechneten E-Moduli wurden in Tafel 21 zusammengestellt. Die angegebenen Werte stellen Mittelwerte aus jeweils 2 Messungen an 2 bzw. 4 Balken dar. Die Abweichungen der jeweiligen Einzelmessungen voneinander waren gering.

Tafel 21

Dehnungen in mm/m Elastizitätsmoduli E_B in Mp/cm^2

4.4.2.1 Rheinsandanteil der Betone: 45 %

Lager. d. Pr.	Alter d. Pr. i. Tg.	Biegezug- spannung kp/cm ²	Zuschlagstoff > 7 mm					
			Rhein- kies	Moräne- kies	Muschel- kalk	Quarzit	Granit	Porphyry
W	14	20	0,045 444	0,044 449	0,047 423	0,047 423	0,039 519	0,052 386
		30	0,081 368	0,075 402	0,081 372	0,079 379	0,066 457	0,096 313
		40	0,112 357	0,104 382	0,117 343	0,106 377	0,095 423	0,150 267
		50	0,147 340	0,140 357	0,165 302	0,150 333	0,135 369	
	28	20	0,041 433	0,041 438	0,049 368	0,041 439	0,030 641	0,053 354
		30	0,069 433	0,069 438	0,081 368	0,068 439	0,047 641	0,085 354
		40	0,100 401	0,101 397	0,115 348	0,099 406	0,072 558	0,135 295
		50	0,141 355	0,131 382	0,154 324	0,139 358	0,099 503	
	56	20	0,039 514	0,038 525	0,043 465	0,039 511		0,051 395
		30	0,067 446	0,064 467	0,071 422	0,062 496	0,047 636	0,084 358
		40	0,094 426	0,092 434	0,104 384	0,089 450	0,064 630	0,122 327
		50	0,128 390	0,127 394	0,146 342	0,128 390	0,089 562	0,177 282

Fortsetzung Tafel 21

Lager. d. Pr.	Alter d.Pr. i.Tg.	Biegezug- spannung kp/cm ²	Zuschlagstoff > 7 mm					
			Rhein- kies	Moräne- kies	Muschel- kalk	Quarzit	Granit	Porphyrr
L	28	20	0,049 406	0,049 406	0,046 436	0,039 506	0,028 717	0,056 359
		30	0,082 367	0,085 352	0,076 383	0,071 421	0,048 620	0,094 318
		40	0,116 343	0,126 318	0,117 341	0,109 368	0,079 509	0,148 271
	56	20	0,042 481	0,043 468	0,035 572	0,034 590		0,055 364
		30	0,076 393	0,073 411	0,060 500	0,058 519	0,045 675	0,099 303
		40			0,092 435	0,091 437	0,074 540	0,158 254

4.4.2.2 Rheinsandanteil der Betone: 60 %

W	14	20	0,044 458	0,043 462	0,049 405	0,045 443	0,031 636	0,052 384
		30	0,073 413	0,070 431	0,081 372	0,074 408	0,062 483	0,088 340
		40	0,109 366	0,096 417	0,116 345	0,102 393	0,096 415	0,124 323
		50	0,145 344	0,127 343	0,154 324	0,137 364	0,141 354	0,171 292
	28	20	0,042 477	0,039 511	0,050 403	0,043 468	0,038 530	0,049 410
		30	0,070 429	0,062 485	0,082 367	0,073 412	0,065 464	0,083 361
		40	0,105 382	0,091 441	0,113 353	0,106 378	0,099 403	0,125 320
		50	0,156 321	0,123 407	0,150 333	0,134 372	0,126 398	
	56	20	0,039 517	0,038 525	0,039 508	0,039 510	0,032 620	0,049 411
		30	0,071 426	0,062 487	0,071 420	0,065 462	0,057 527	0,082 365
		40	0,102 392	0,089 448	0,108 370	0,095 408	0,085 473	0,118 340
		50	0,139 359	0,120 417	0,143 348	0,131 373	0,114 438	0,163 307

Fortsetzung Tafel 21

Lager. d. Pr.	Alter d. Pr. i. Tg.	Biegezug- spannung kp/cm ²	Zuschlagstoff > 7 mm					
			Rhein- kies	Moräne- kies	Muschel- kalk	Quarzit	Granit	Porphyry
L	28	20	0,051 392	0,043 462	0,046 434	0,045 449	0,033 602	0,051 390
		30	0,105 284	0,077 388	0,084 357	0,081 371	0,062 483	0,094 318
		40	0,162 247		0,129 310	0,134 299	0,090 444	0,145 275
	56	20	0,043 463	0,036 549	0,041 487	0,040 500	0,031 644	0,055 362
		30	0,077 392	0,063 478	0,073 411	0,073 411	0,052 582	0,094 320
		40		0,090 446	0,114 350	0,116 345	0,089 448	0,131 306

4.4.2.3 Betone mit Ausfallkörnungen

Lagerung der Proben	Alter der Proben in Tagen	Biegezug- spannung kp/cm ²	Zuschlagstoff > 7 mm		
			Quarzit	Granit	Porphyry
W	14	20	0,041 482	0,040 502	0,051 393
		30	0,074 406	0,072 417	0,094 320
		40	0,112 366	0,100 401	0,140 286
	28	20	0,042 475	0,035 571	0,050 400
		30	0,068 439	0,058 517	0,083 360
		40	0,097 412	0,082 488	0,131 304
		50	0,140 355	0,113 441	0,173 288
	56	20	0,040 500		0,051 390
		30	0,064 468	0,050 598	0,083 362
		40	0,095 421	0,078 513	0,123 324
		50	0,132 378	0,104 480	0,180 278

Fortsetzung Tafel 21

Lagerung der Proben	Alter der Proben in Tagen	Biegezugspannung kp/cm ²	Zuschlagstoff > 7 mm		
			Quarzit	Granit	Porphyry
L	28	20	0,051 339	0,045 441	0,055 363
		30	0,083 360	0,079 378	0,095 315
		40	0,126 317	0,122 328	0,147 272
	56	20	0,045 445		0,056 357
		30	0,62 483	0,050 600	0,097 310
		40	0,099 404	0,086 465	0,156 256

In Anlage 7 und 7a sind die E-Moduli der Betone für $\sigma_{bz} = 30 \text{ kp/cm}^2$ graphisch dargestellt.

Wie aus der vorstehenden Tabelle hervorgeht, bestehen zwischen den Werten der E-Moduli je nach Beanspruchung, Alter, Lagerung und Betonart der Probe erhebliche Unterschiede. Bei einer Biegezugspannung von $\sigma_{bz} = 30 \text{ kp/cm}^2$ schwanken die Werte zwischen 284 Mp/cm^2 und 675 Mp/cm^2 . Sämtliche E-Modul-Werte wurden aus wiederholten Bestätigungsversuchen abgeleitet, da schon geringste Fehler bei der Dehnungsmessung im Bereich niedriger Betonbeanspruchung zu erheblichen Unsicherheiten bei der Berechnung des E-Moduls führen.

Bei allen Betonen ist ein mehr oder weniger starkes Anwachsen des E-Moduls mit dem Alter des Betons festzustellen.

Der Einfluß der Lagerung der Betone auf ihren E-Modul ist nicht sehr erheblich. Eine einheitliche Tendenz läßt sich hier nicht erkennen. Teils liegen die E-Moduli luftgelagerter Proben

über teils unter den zugehörigen Werten wassergelagerter Probekörper. Die Differenzen betragen in der Regel nicht mehr als $\pm 10 \%$.

Unterschiedliche Grobzuschläge führten bei Betonen gleicher Sieblinie zu zum Teil nicht unerheblichen Unterschieden in den E-Moduln. Setzte man in den jeweiligen Versuchsreihen den E-Modul des Rheinkies-Betons mit 100 % an, so ergaben sich i. M. folgende Reaktionen:

Sieblinie "a" (45 % Feinanteil)

Rheinkies	100 %
Moränekies	102 %
Muschelkalk	97 %
Quarzit	117 %
Granit	135 %
Porphyr	79 %

Sieblinie "b" (60 % Feinanteil)

Rheinkies	100 %
Moränekies	114 %
Muschelkalk	99 %
Quarzit	106 %
Granit	129 %
Porphyr	88 %

In Anlage 7a wurden die bei einer Biegezugsspannung von $\sigma_{bz} = 30 \text{ kp/cm}^2$ ermittelten E-Moduli der Versuchsbetone E_B den Elastizitätsmoduln der Zuschlaggesteine E_S zugeordnet. Deutlich erkennbar ist bei allen Diagrammen, daß der E-Modul der Straßenbetone mit steigendem E-Modul der Grobzuschläge zunimmt. Einige Unstetigkeiten in den Kurven sowie die geringe Anzahl der einander zugeordneten Werte lassen eine genaue Bestimmung der Gesetzmäßigkeit dieser Zunahme nicht zu. Als erste grobe Abschätzung kann aus den Diagrammen geschlossen werden, daß der Beton-E-Modul bei Verwendung härterer Zuschlagstoffe etwa linear mit dem Elastizitätsmodul der Gesteine zunimmt. Aus Tafel 21 geht hervor, daß auch bei höheren oder niedrigeren Biegezugsspannungen die E-Moduli der unter Verwendung gebroche-

ner Zuschlagstoffe hergestellten Betone ihrer Größe nach fast ausnahmslos in der nachstehenden Reihenfolge auftraten: Porphyr, Muschelkalk, Quarzit, Granit.

Die Veränderung der Kornzusammensetzungen unter Beibehaltung gleicher Zuschlaggesteine führte nur zu geringen Unterschieden in den Elastizitätsmoduln. Bei höherem Feinkornanteil lagen die E-Moduli der Reihe "b" (60 % Feinanteil) i. a. geringfügig unter denen der Reihe "a" (45 % Feinanteil). Es mag dies auf den etwas höheren Zementleimanteil dieser Betone zurückzuführen sein. Ausnahmen bildeten die Betone mit Porphyr und Moränekies, deren E-Modul bei höherem Feinkornanteil etwas anstieg. Die Betone der Reihe "c" (Ausfallkörnung) haben ebenfalls einen etwas niedrigeren E-Modul als die zugeordneten Betone der Reihe "a", auch hier bildet der Porphyr-Beton eine Ausnahme.

In Anlage 7b werden die bei $\sigma_{bz} = 30 \text{ kp/cm}^2$ an wassergelagerten Prüfkörpern ermittelten E-Moduli der Betone in Beziehung zu den Würfeldruckfestigkeiten gesetzt und mit den Angaben der DIN 4227 verglichen. Die Streuung der Einzelwerte ist recht erheblich; doch gruppieren sie sich alle um eine mittlere Gerade, deren gute Übereinstimmung mit den Werten der DIN 4227 auffällt.

4.4.3 Bruchdehnungen

Die Bruchdehnungen wurden mit der im vorigen Abschnitt beschriebenen Meßvorrichtung ermittelt. Das automatische Registriergerät lieferte Aufzeichnungen über die Dehnungen des Probekörpers bis unmittelbar vor dem Bruch der Proben.

Jedoch muß einschränkend bemerkt werden, daß die Meßergebnisse infolge einer nicht völlig vermeidbaren Trägheit der Schreib-einrichtung in einigen Fällen geringe Ungenauigkeiten aufweisen können.

In Tafel 22 sind die Ergebnisse zusammengefaßt.

Tafel 22

Bruchdehnungen der Betone in mm/m

4.4.3.1 Rheinsandanteil der Betone: 45 %

Lager. d. Pr.	Alter d.Pr. i.Tg.	Zuschlagstoff > 7 mm					
		Rhein- kies	Moräne- kies	Muschel- kalk	Quarzit	Granit	Porphyry
W	14	0,175	0,184	0,213	0,233	0,196	0,288
	28	0,186	0,145	0,247	0,230	0,159	0,269
	56	0,165	0,186	0,209	0,220	0,150	0,264
L	28	0,205	0,214	0,210	0,253	0,181	0,227
	56	0,170	0,182	0,153	0,242	0,165	0,247

4.4.3.2 Rheinsandanteil der Betone: 60 %

W	14	0,158	0,161	0,209	0,216	0,217	0,273
	28	0,178	0,178	0,245	0,202	0,195	0,225
	56	0,189	0,193	0,257	0,239	0,171	0,208
L	28	0,207	0,239	0,229	0,263	0,194	0,247
	56	0,168	0,139	0,207	0,213	0,161	0,255

4.4.3.3 Betone mit Ausfallkörnung

W	14				0,204	0,192	0,280
	28				0,180	0,188	0,295
	56				0,180	0,169	0,265
L	28				0,232	0,199	0,240
	56				0,210	0,173	0,217

Die höchsten Dehnungen wurden an Betonen mit Porphyry, Muschelkalk und Quarzit, d. h. an Betonen mit gebrochenen Zuschlagstoffen, gemessen; die maximal erzielte Bruchdehnung betrug 0,29 %. Die geringsten Bruchdehnungen ließen sich an Betonen mit Rheinkies, Moränekies und Granit feststellen. Anlage 8 zeigt, daß mit nur wenigen Ausnahmen die Kiesbetone niedrigere Bruchdehnungen als die mit gebrochenen Zuschlagstoffen hergestellten Betone erzielten (wie in Folgenden erläutert wird, sind die geringen Bruchdehnungen der Granitbetone auf den hohen E-Modul des Grobzuschlages zurückzuführen). Die als Grobzuschläge verwendeten Kiese waren verhältnismäßig rund und glatt. Die Verbindung der Kiesel mit dem Feinmörtel und Zementkies war dementsprechend nicht sehr fest. Wie die Bruchbilder zeigen, wies die Fuge Kieskorn/Zementleim den schwächsten Verbund auf; ausnahmslos lösten sich die groben Kiesel unzerstört aus dem umgebenden Mörtel. Der Bruch der Probekörper wurde vermutlich regelmäßig an einer dieser schwachen Stellen eingeleitet. Die gebrochenen Zuschläge wiesen dagegen scharfe Kanten und Ecken sowie eine rauhe Oberfläche auf. Ihre Verzahnung und Verbindung mit dem Feinmörtel war gut, sie lösten sich nur in den seltensten Fällen unzerstört aus dem Zementleim. Der Bruch der Probekörper trat mithin ein, wenn die Zugfestigkeit der groben Zuschlaggesteine erschöpft war. Die höheren Bruchdehnungen der mit gebrochenen Grobzuschlägen hergestellten Betone lassen sich daher aus den verhältnismäßig großen Bruchdehnungen der auf Zug beanspruchten einzelnen großen Zuschlagkörner in der Biegezugzone der Probekörper erklären. Die Dehnungen der glatt aus dem Mörtel herausgelösten Kiesel waren demgegenüber weniger stark.

Ein besonderer Einfluß der Kornzusammensetzung der Betone auf die Bruchdehnungen läßt sich aus den Untersuchungsergebnissen nicht herleiten.

Die in Anlage 8a den Elastizitätsmoduln der Zuschlagstoffe zugeordneten Bruchdehnungen weisen in ihren Kurvenverläufen einige Unstetigkeiten auf. Dennoch läßt sich insgesamt aus den Linienzügen die Tendenz ablesen, daß die Bruchdehnungen der untersuchten Straßenbaubetone geringer sind, je höher der

E-Modul der verwendeten Zuschlagstoffe ist. Allgemein weisen die mit Porphyr hergestellten Betone die höchsten Bruchdehnungen auf, Granitbetone die niedrigsten. Die Zusammenfassung der Anlage 8b läßt diese Tendenz noch deutlicher werden.

Die Versuchsergebnisse lassen nicht den Schluß zu, daß die Art der Lagerung einen großen Einfluß auf die Bruchdehnungen von Straßenbetonen hat. Teils sind die Bruchdehnungen luftgelagerter Proben niedriger, teils aber auch höher als die wassergelagerter Probekörper.

Die Proben wurden - wie schon in Abschnitt 4.4.1 beschrieben - sämtlich mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit geprüft. Die zwar feststellbaren jedoch nicht sehr erheblichen Unterschiede in den Bruchdehnungen der einzelnen Betonarten dürften auf dieses Prüfverfahren zurückzuführen sein:

Der Bruch der Proben trat i. a. schlagartig und ohne besondere Vorankündigung ein; ein "Fließen" und Überdehnen der Biegezugzone unter konstanter Last konnte infolgedessen nur selten und kurzzeitig festgestellt werden, so daß es in einigen Fällen schwierig war, die Dehnungen bzw. die Längenänderungen des Meßgebers unmittelbar vor und nach dem Bruch eindeutig voneinander zu unterscheiden. Trotz dieses relativ unvollkommenen Untersuchungsverfahrens konnten im Rahmen der ihm eigenen Meßgenauigkeit die vorerwähnten Relationen zwischen Bruchdehnung der Betone und E-Modul der Zuschlagstoffe ermittelt werden. Es ist jedoch zu erwarten, daß unter Verwendung von Prüfmaschinen mit verformungsabhängiger Lasteintragung deutlichere Unterschiede im Verformungsverhalten der verschiedenen Betone herausgearbeitet werden könnten. Der Bruchvorgang, der bei Untersuchungen von unbewehrten Betonen mit gleichmäßiger Belastungszunahme innerhalb von Sekundenbruchteilen abläuft, könnte bei verformungsabhängiger Laststeigerung - insbesondere bei Belastung mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit - in ein allmähliches "Fließen" übergehen. Hierdurch lassen sich selbst dann noch mit verhältnismäßig hoher Meßgenauigkeit feine Unterschiede im Bruchverhalten und in den Bruch-

dehnungen einzelner Betone verschiedener Zusammensetzung ermitteln, während Untersuchungen mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit lediglich gewisse Einflußtendenzen aufzeigen.

Die mit den zur Verfügung stehenden Mitteln durchführbaren Untersuchungen zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Straßenbetonen lassen folgenden Schluß zu: Maßgebend für die Bruchdehnungen eines Betons dürften vor allem die Kornform, die Oberflächenrauigkeit - somit die Haftung der Zuschlagkörner im Zementleim - sowie der Elastizitätsmodul des Zuschlaggesteins sein.

5. Zusammenfassung

An 15 verschiedenen Versuchsbetonen, die aus 6 unterschiedlichen Zuschlaggesteinen und in 3 verschiedenen Kornzusammensetzungen hergestellt wurden, sollte der Einfluß der Gesteinsart sowie der Kornzusammensetzung auf die Verformbarkeit von Straßenbetonen hoher Druckfestigkeit unter Biegebeanspruchung geklärt werden.

In einer Reihe von Zusatzversuchen wurde festgestellt, daß die Biegezug-, Spaltzug- und Druckfestigkeit der Betone durch unterschiedliche Zuschlagstoffe und Kornzusammensetzungen nur unwesentlich beeinflußt werden.

Bei Proben, die Schwindeinflüssen infolge Austrocknung ausgesetzt waren, traten allgemein Abminderungen der Biegezugfestigkeiten ein. Der Einfluß des Austrocknungsvorganges auf die Spaltzugfestigkeit war weniger ausgeprägt. Es zeigte sich, daß Betone mit relativ "weichem" Zuschlagstoff (z. B. Porphyr) geringere Verminderungen der Biegezugfestigkeit erlitten als Betone mit Hartgestein (z. B. Granit). Der Einfluß des E-Moduls des groben Zuschlagstoffes auf die Biegezugfestigkeit eines an der Luft getrockneten Betons war unverkennbar. Betone, deren Zuschlagstoffe rauhe Oberflächen hatten (gebrochene Gesteine),

zeigten bei Luftlagerung weniger hohe Abminderungen der Biegezugfestigkeit als Betone aus glatten und runden Kiesen.

Die Untersuchung des Verformungsverhaltens der Betone ergab, daß der E-Modul und die Bruchdehnung des Betons spürbar durch den E-Modul der verwendeten Zuschlagstoffe beeinflusst wird. Die E-Moduli der hiermit hergestellten Betone zeigten bei den Untersuchungen fast ohne Ausnahme der Größe nach dieselbe Reihenfolge wie die E-Moduli der nachstehenden Gesteine: Porphyry, Muschelkalk, Quarzit, Granit.

Wenngleich aus den Ergebnissen eine genaue Gesetzmäßigkeit nicht hergeleitet werden kann, lassen sie doch als Abschätzung den Schluß zu, daß der E-Modul des Betons etwa linear mit dem E-Modul der verwendeten Zuschlagstoffe zunimmt. Verringerung des Hartgesteinanteils in der Mischung führte zu Abminderungen des E-Moduls. Vermutlich wies der zur Verfügung stehende Porphyry einen niedrigeren E-Modul auf als die im Rheinkies überwiegend enthaltenen Gesteinsanteile. Auf diese Ursache dürfte die Erhöhung des Beton-E-Moduls bei Verringerung des Porphyryanteils zurückzuführen sein.

Auch die Bruchdehnungen der Betone zeigten eine Abhängigkeit vom E-Modul der Zuschlaggesteine. Bei Betonen mit verhältnismäßig "weichen" Zuschlägen wurden die höchsten Dehnungen gemessen. So erzielten mit Porphyry hergestellte Betone die 1,5-fachen Bruchdehnungen, die am Granitbeton festgestellt wurden. Insgesamt legen die Versuchsergebnisse den Schluß nahe, daß die Bruchdehnungen eines Betons um so niedriger sind, je höher der E-Modul der verwendeten Zuschlaggesteine ist. Kornform und Oberflächenrauigkeit der Zuschlagstoffe sind insofern von Einfluß auf die Bruchdehnungen, als glatte und runde Zuschlagkörner bei Biegebeanspruchung ohne vorherige größere Eigendehnung unzerstört aus dem Feinmörtel herausgelöst werden, wodurch der Bruch der Proben eingeleitet wird. Zuschlagstoffe mit rauher Oberfläche wurden dagegen beansprucht, bis ihre Zugfestigkeit erreicht war, wobei die einzelnen Zuschlagkörner bis zum Bruch erhebliche Eigendehnungen erfuhren. Demzufolge

ergaben Kiesbetone aufgrund der begrenzten Haftung ihrer relativ glatten Zuschlagkörner im Feinmörtel in der Regel geringere Bruchdehnungen.

Im Vergleich zu älteren, umfassenden Versuchsreihen [1] wiesen alle untersuchten Betone höhere Elastizitätsmoduli auf, erreichten jedoch erheblich geringere Bruchdehnungen als jene Betone geringerer Festigkeit, wie sie Gegenstand dieser älteren Untersuchungen zum gleichen Themenkreis waren.

6. Literaturhinweise

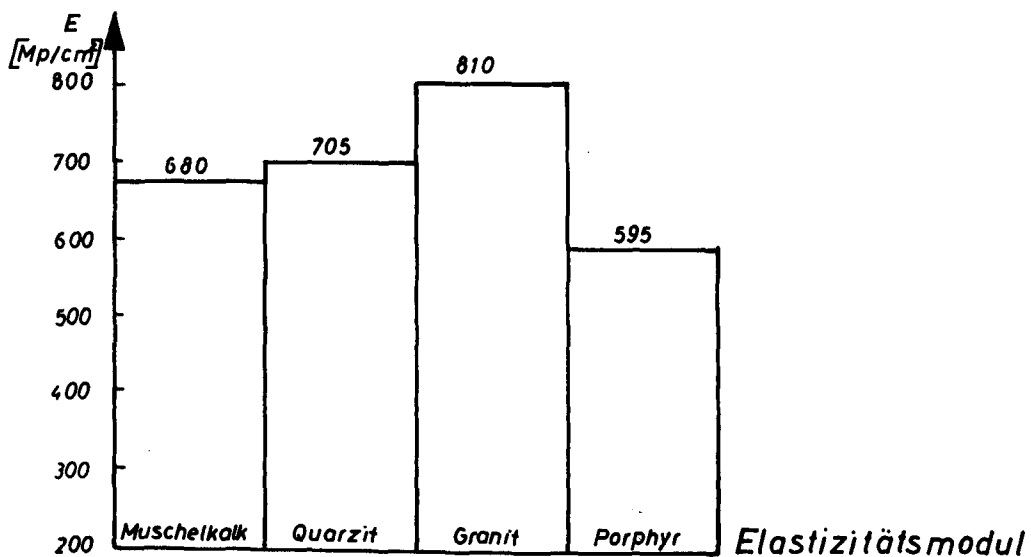
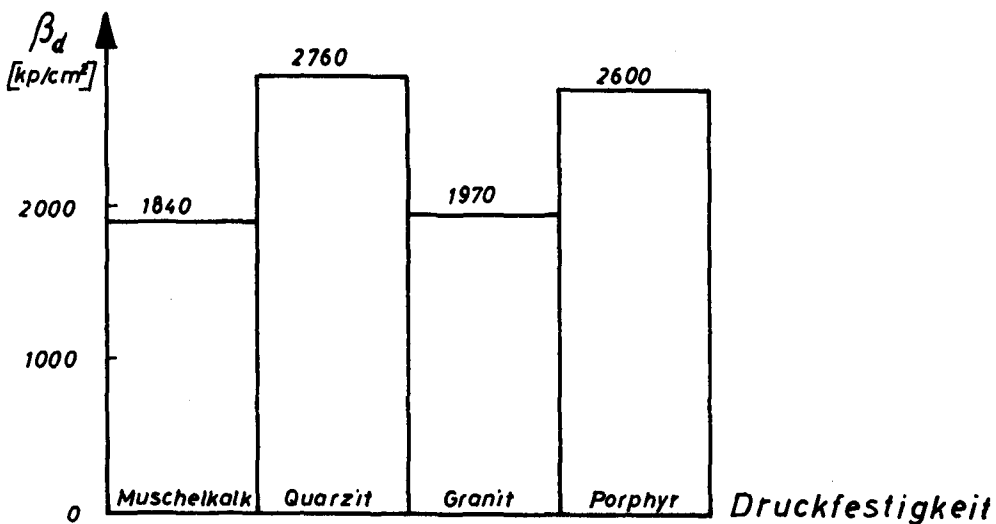
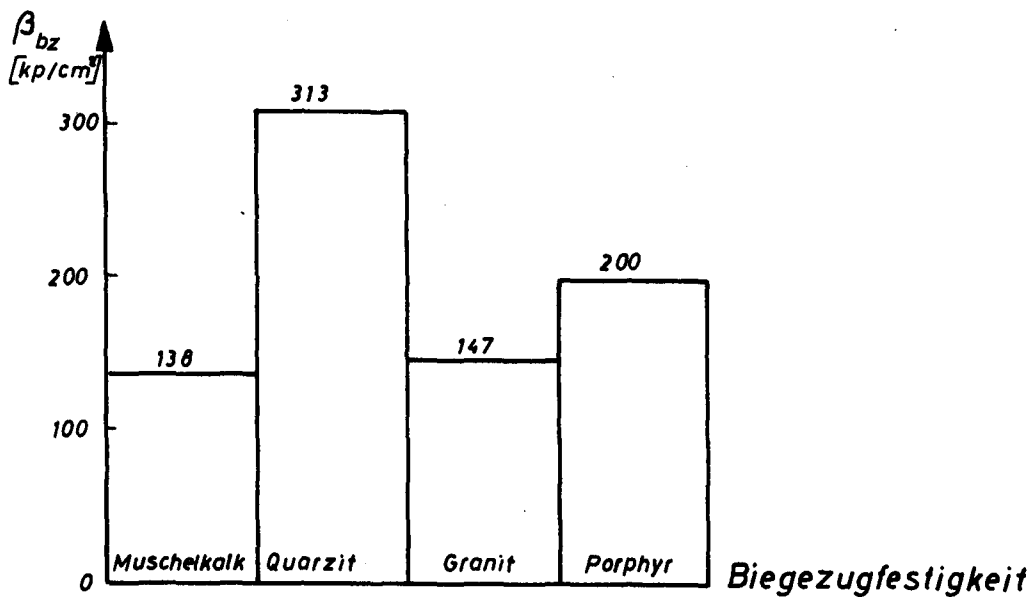
- [1] O. Graf: "Versuche über den Einfluß der Beschaffenheit der groben Zuschläge auf die Eigenschaften des Betons insbesondere des Straßenbetons". Heft 10 der Schriftenreihe der Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen e. V., Berlin, 1937.

- [2] M. F. Kaplan: "Flexural and Compressive Strength of Concrete as Affected by the Properties of Coarse Aggregates", Journal of the American Concrete Institute, 1959.

- [3] R. Jones, M. F. Kaplan: "The effect of coarse aggregate on the mode of failure of concrete in compression and flexure", Magazine of Concrete Research, 1957.

- [4] K. Krenkler: "Gütesteigerung des Betons durch Überzüge", Straßen- und Tiefbau, 1960.

- [5] Goerner: "Verwendung eines genormten Betonprüfkörpers zum Vergleich von Festigkeitsergebnissen von Straßenbeton in verschiedenen Ländern", Straße und Autobahn, 1960.



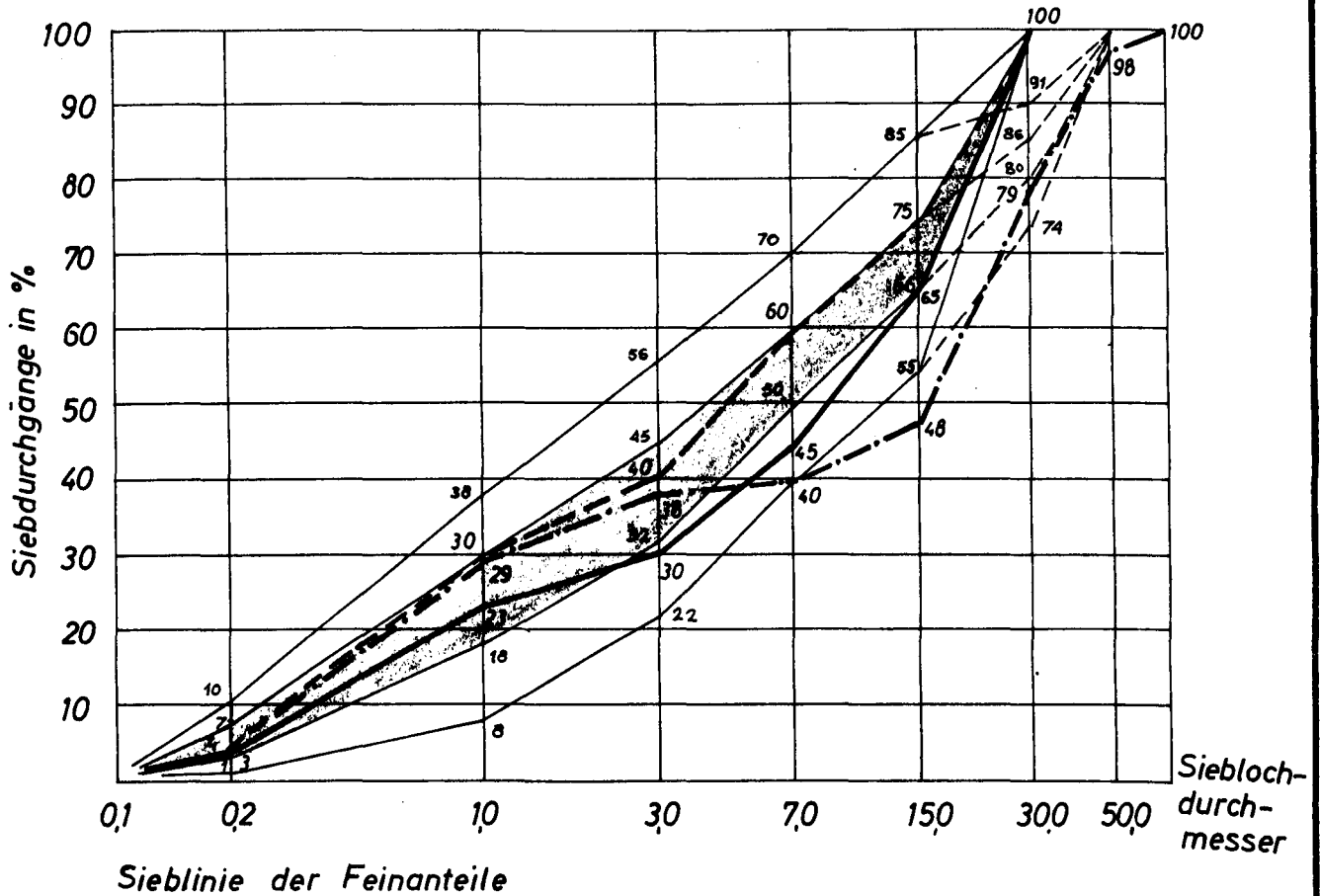
Eigenschaften der Zuschlagstoffe

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Hochschule Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

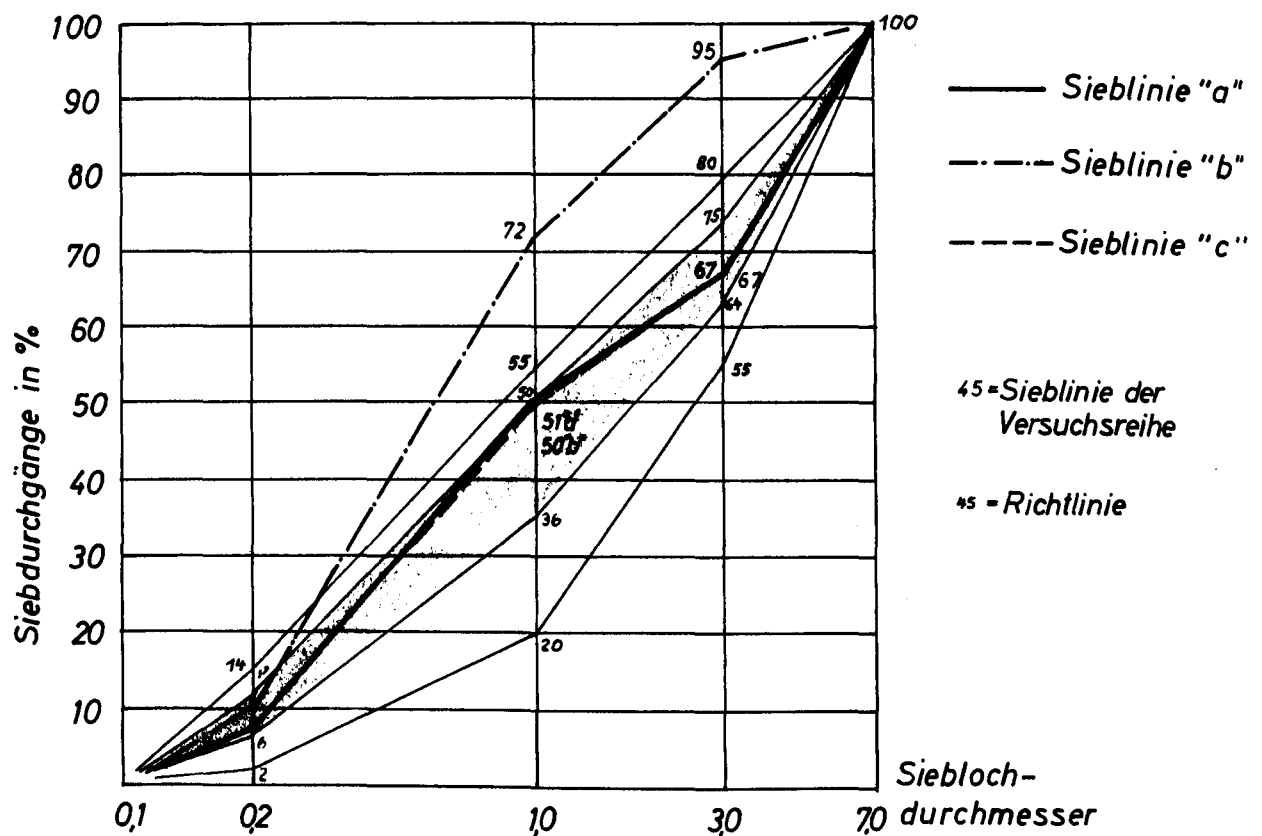
Anlage 1

FA II/31

Gesamtsieblinie



Sieblinie der Feinanteile

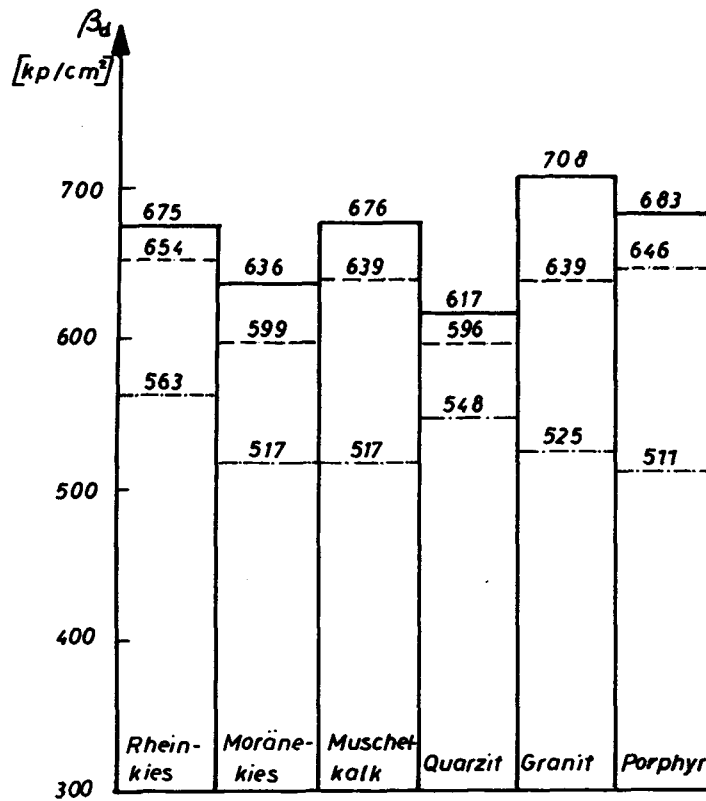


Sieblinien der Versuchsreihen
(n.d. Richtlinien f.d. Bau von Betonfahrbahnen, Ausgabe 1956)

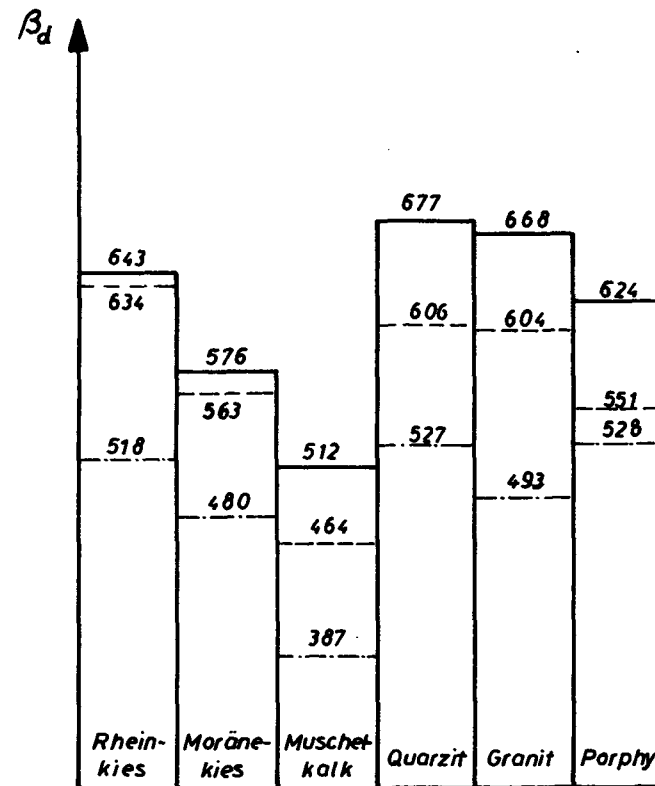
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Hochschule Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Anlage 2

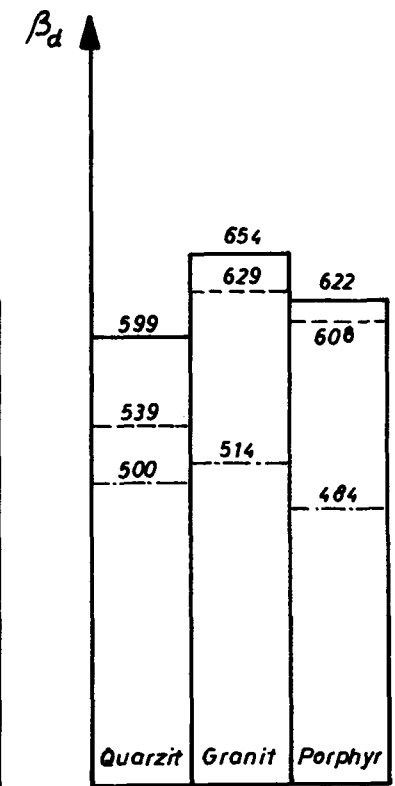
FA II/31



Rheinsandanteil 45%



Rheinsandanteil 60%

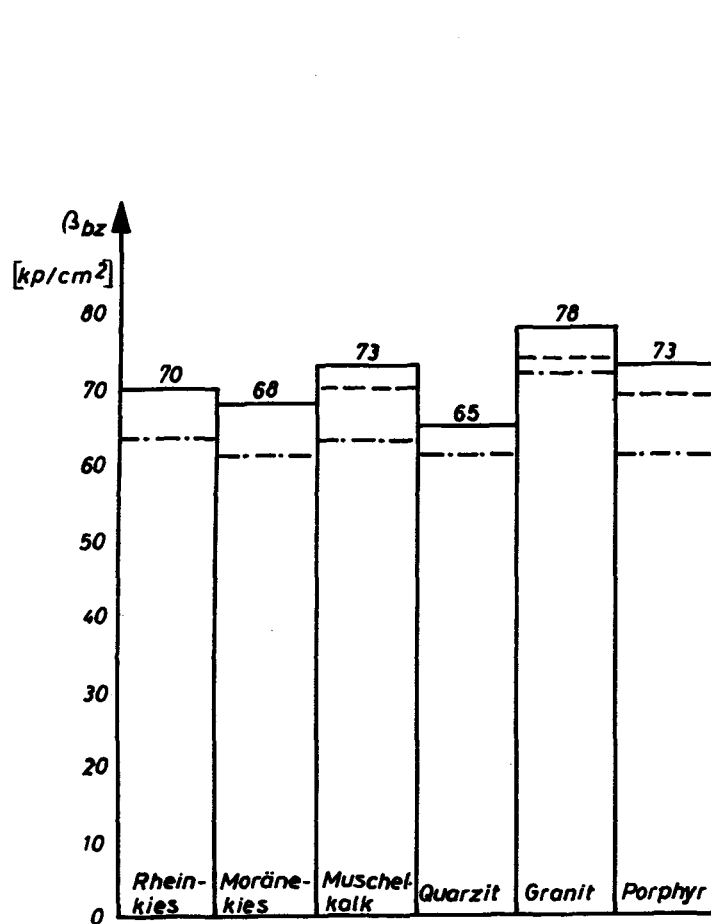


Ausfallkörnung

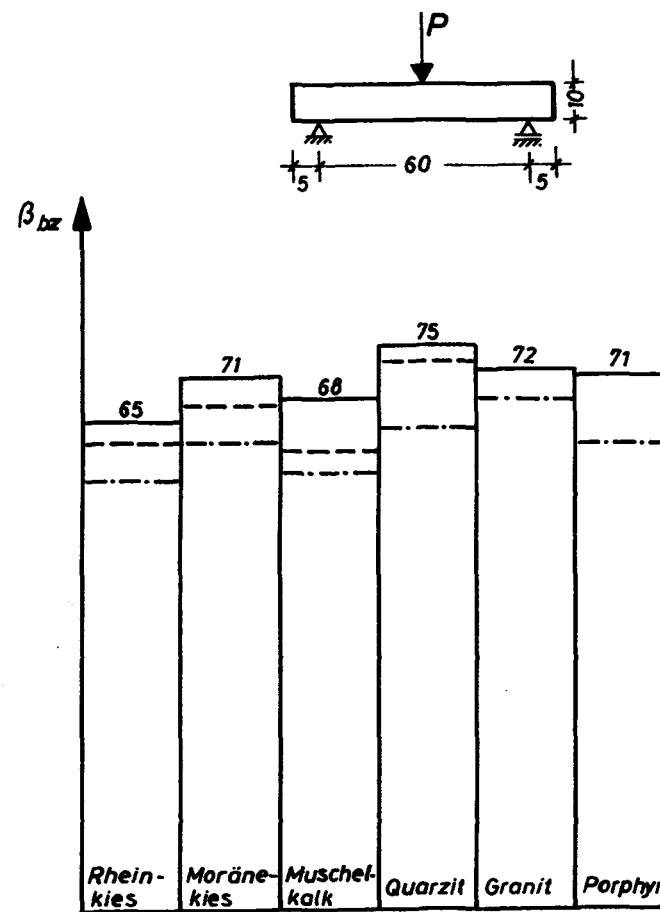
———— 56 Tage

----- 28 Tage

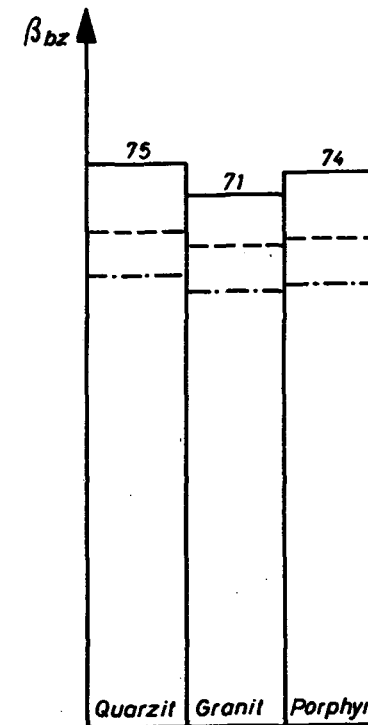
----- 7 Tage



Rheinsandanteil 45 %



Rheinsandanteil 60 %

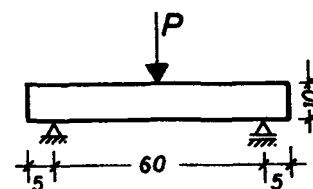


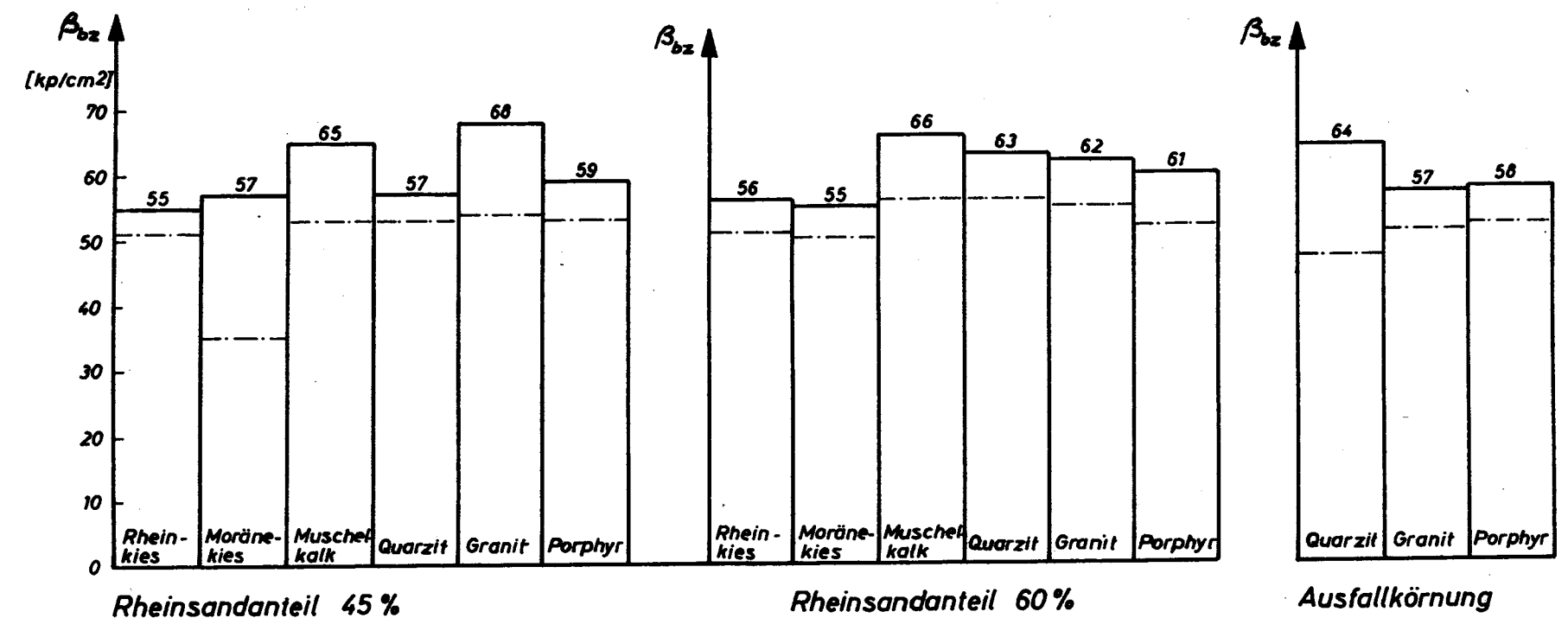
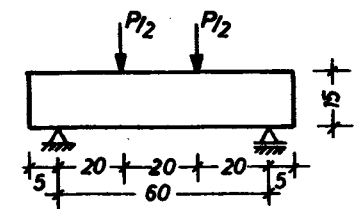
Ausfallkörnung

———— 56 Tage

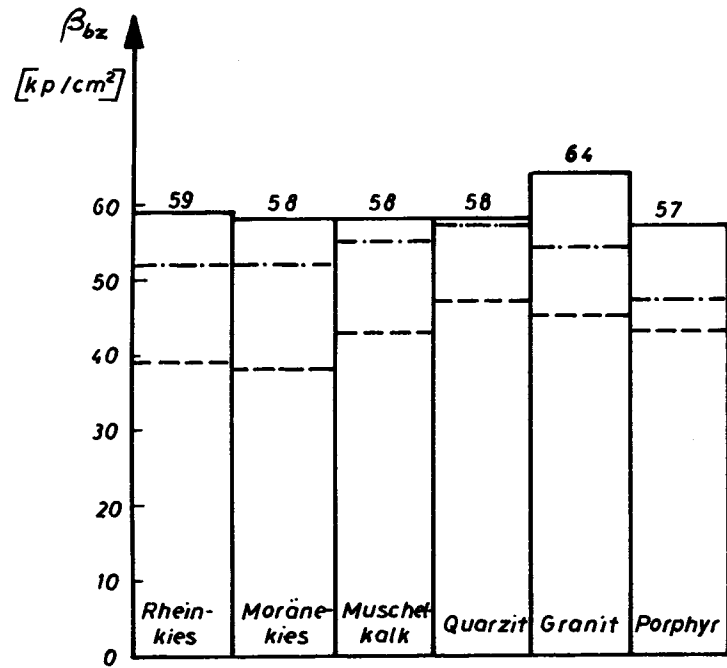
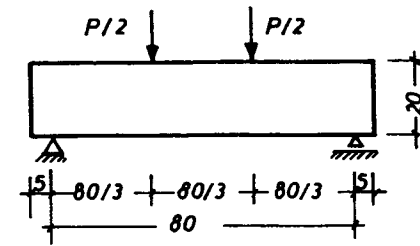
----- 28 Tage

- · - · - 7 Tage

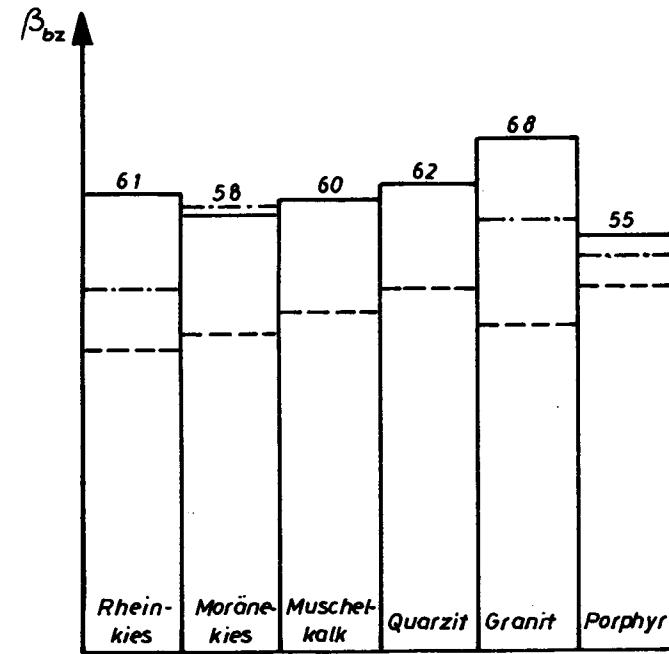




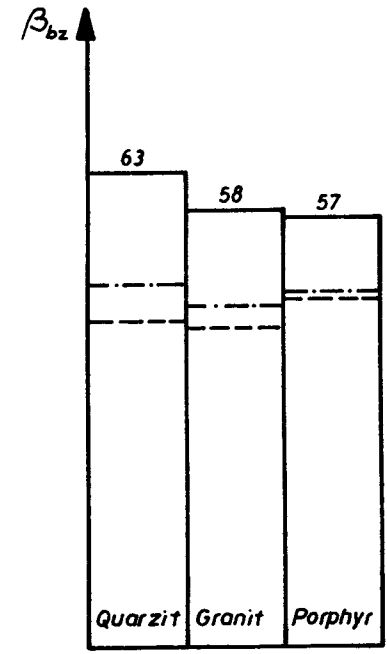
———— = 56 Tage - - - - - = 7 Tage



Rheinsandanteil 45%



Rheinsandanteil 60%



Ausfallkörnung

———— 56 Tage, Lagerung "W"

----- 56 Tage, Lagerung "L"

- - - - - 14 Tage, Lagerung "W"

Biegezugfestigkeit der Betone am Balken 20. 20.90 cm³

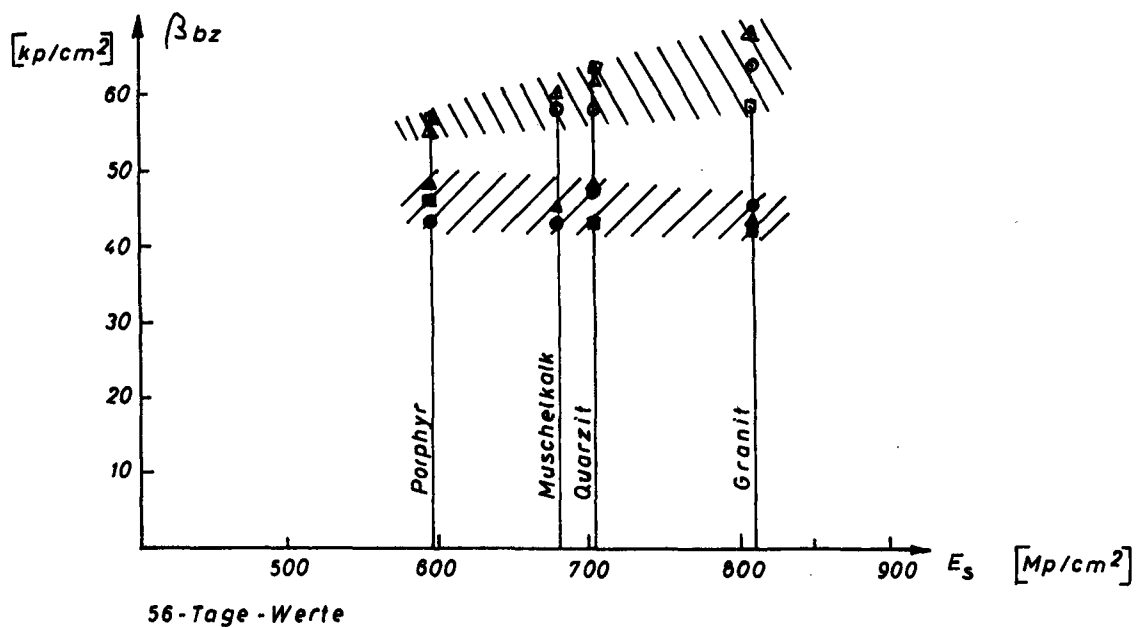
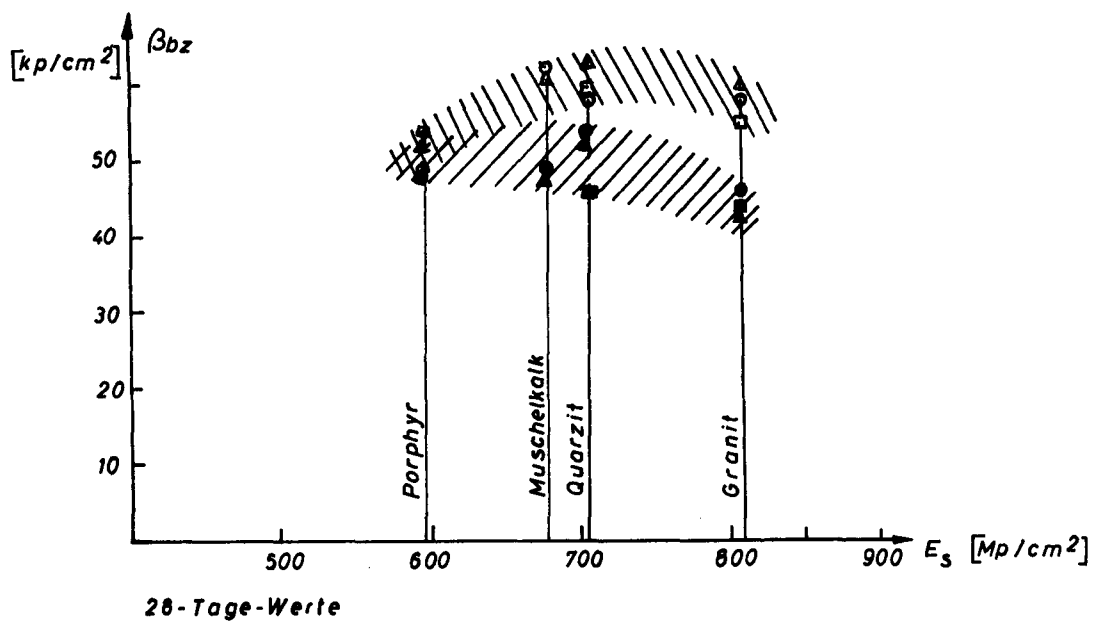
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau

Technische Hochschule Braunschweig

Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Anlage 6

FA II/31



Rheinsandanteil 45% : ○ = Wasserlagerung ● = Luftlagerung

" 60% : ▲ = " ▲ = "

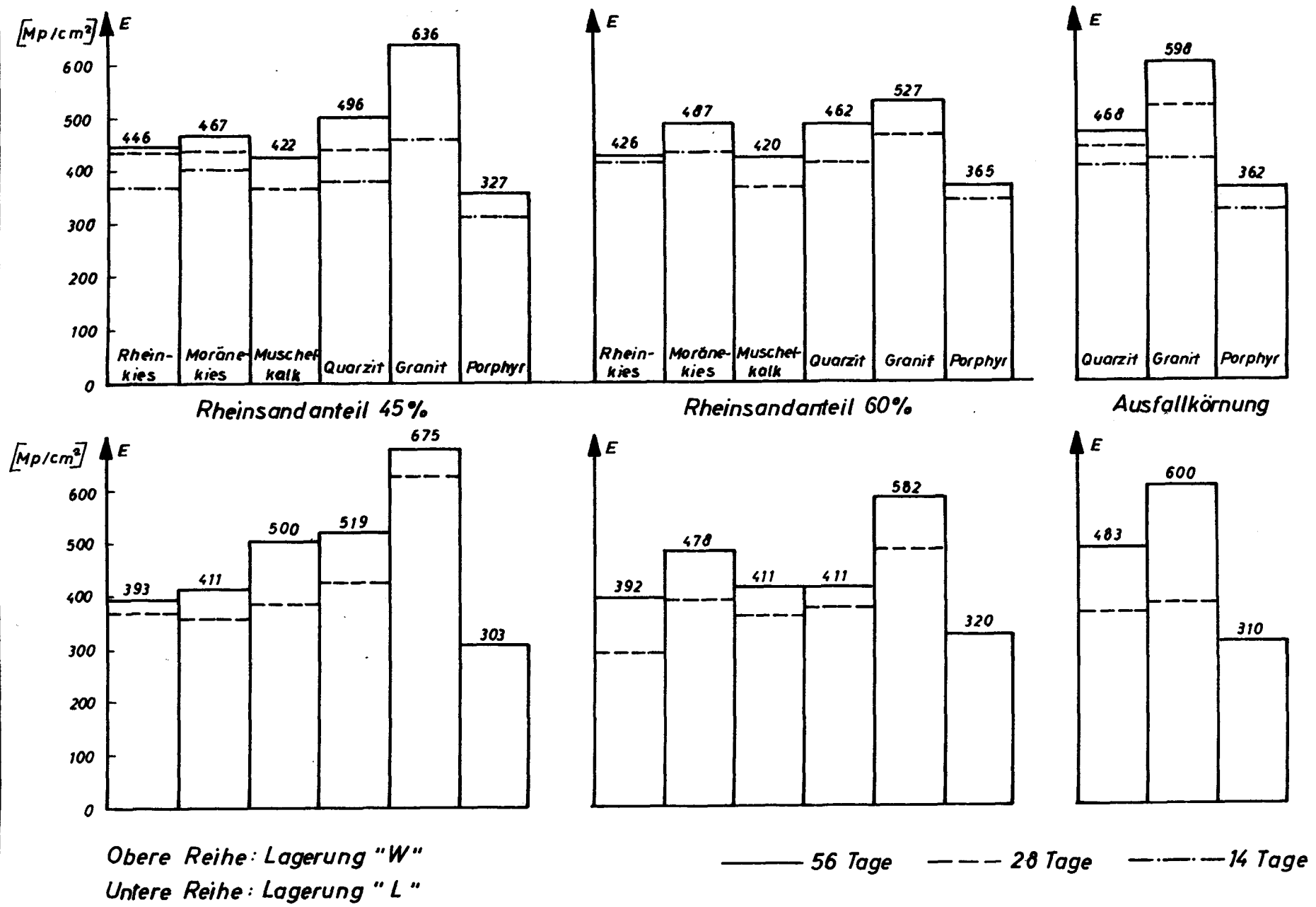
Ausfallkörnung : □ = " ■ = "

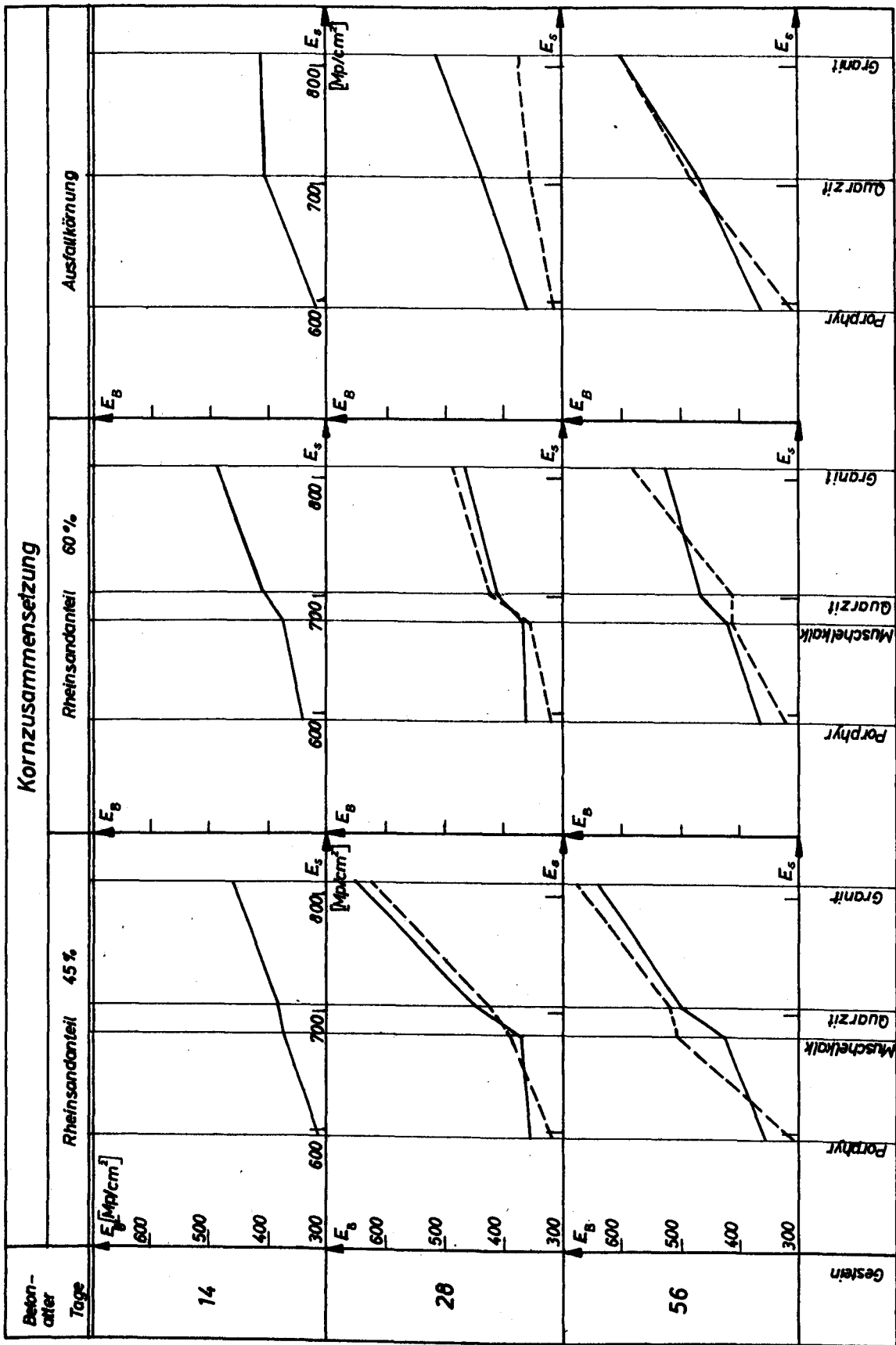
Zusammenhang zwischen Biegezugfestigkeit der Betone
und E-Modul der Zuschlagstoffe (ermittelt an Balken
20 x 20 x 90 cm³)

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Hochschule Braunschweig
Ämliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Anlage 6b

FA II/31



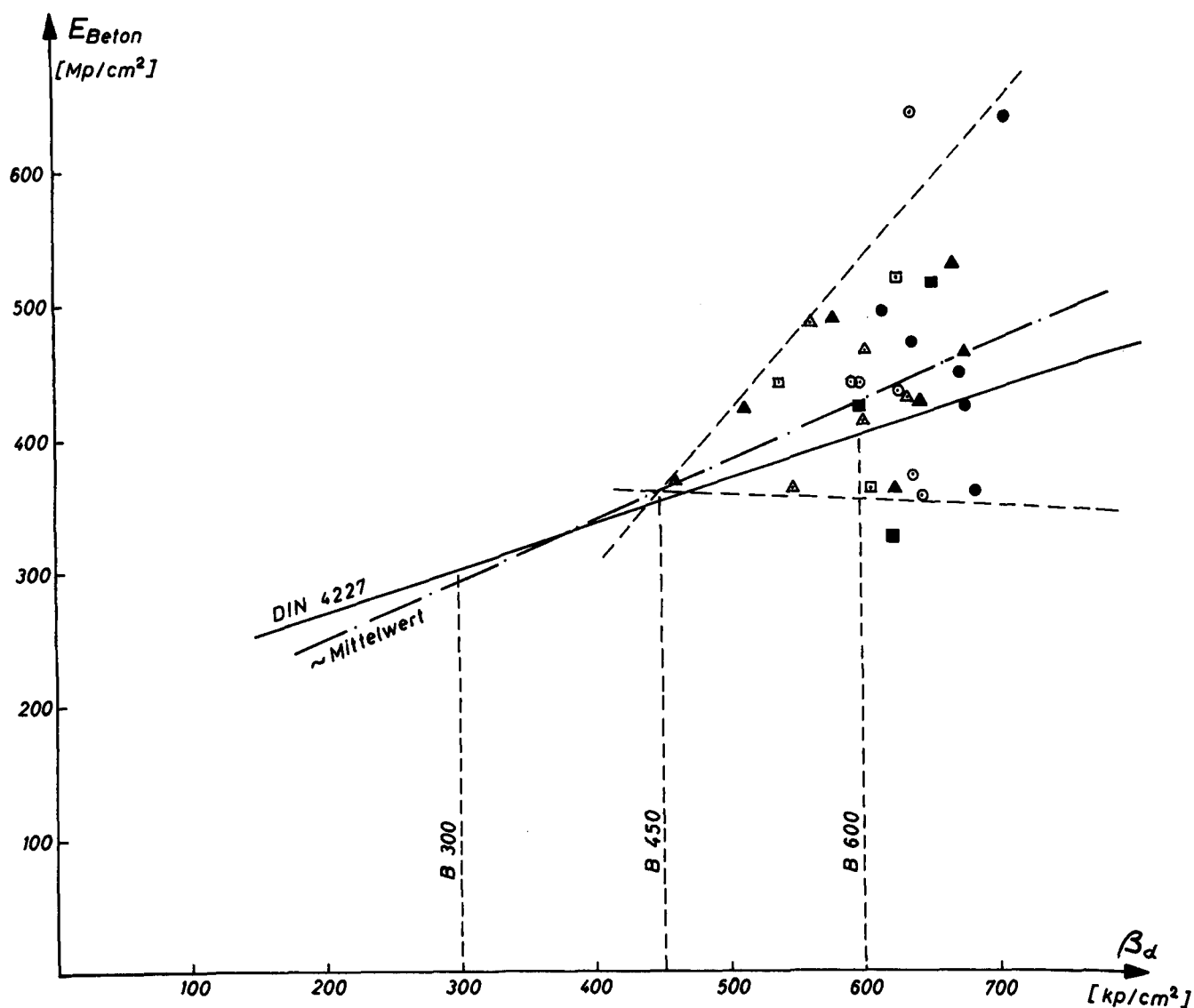


Zusammenhang zwischen den Elastizitätsmodulen der Betone bei $\sigma_{bz} = 30 \text{ kp/cm}^2$ und dem E-Modul der Zuschlagstoffe

Anlage 7a

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
 Technische Hochschule Braunschweig
 Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

FA II/31



Rheinsandanteil 45 % : ○ = 28 - Tage - Werte

● = 56 - Tage - Werte

" 60 % : ▲ = " " "

▲ = " " "

Ausfallkörnung : □ = " " "

■ = " " "

Zusammenhang zwischen den Elastizitätsmoduln der Betone
bei $\sigma_{bz} = 30 \text{ kp/cm}^2$ und der Würfeldruckfestigkeit

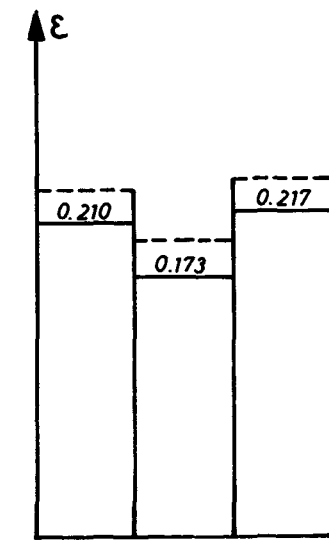
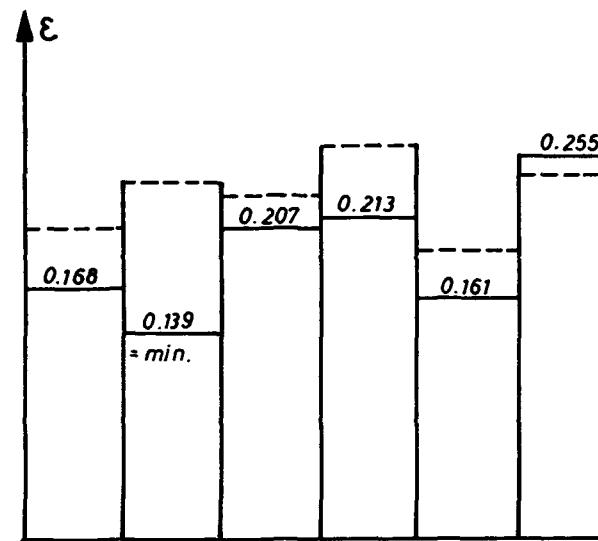
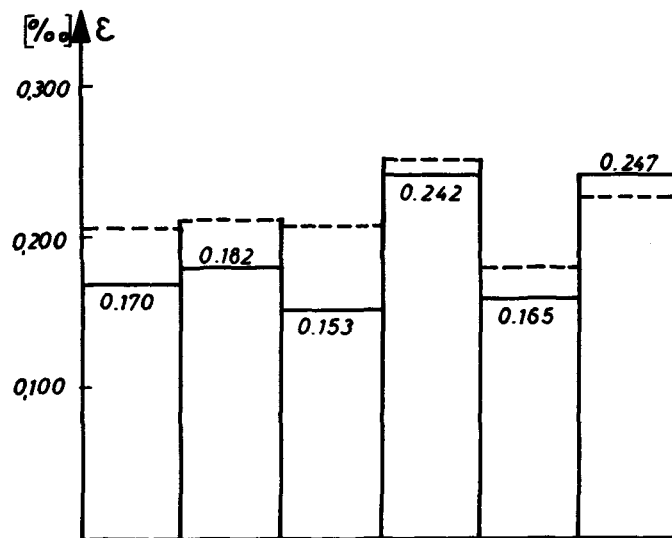
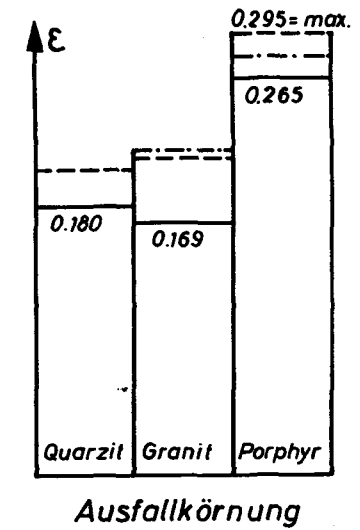
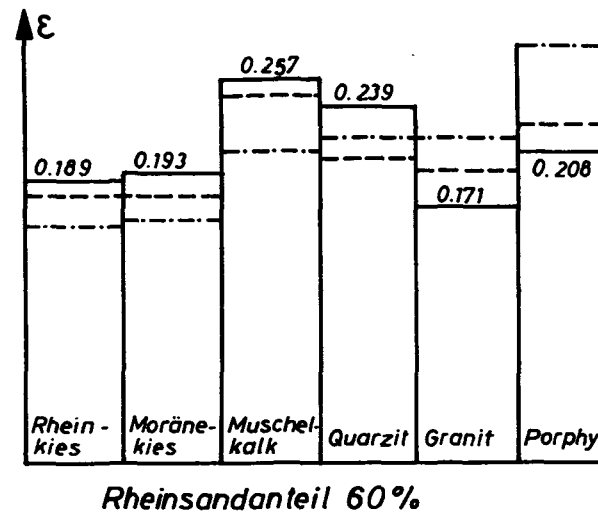
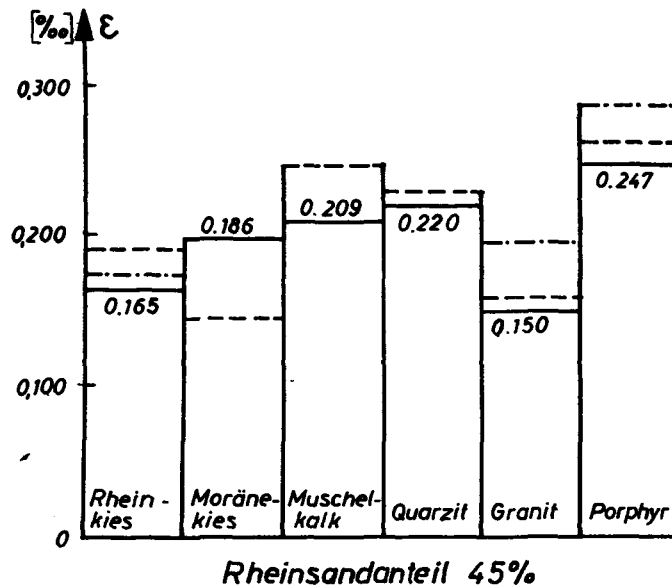
Anlage 7b

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau

Technische Hochschule Braunschweig

Amliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

FA II/31

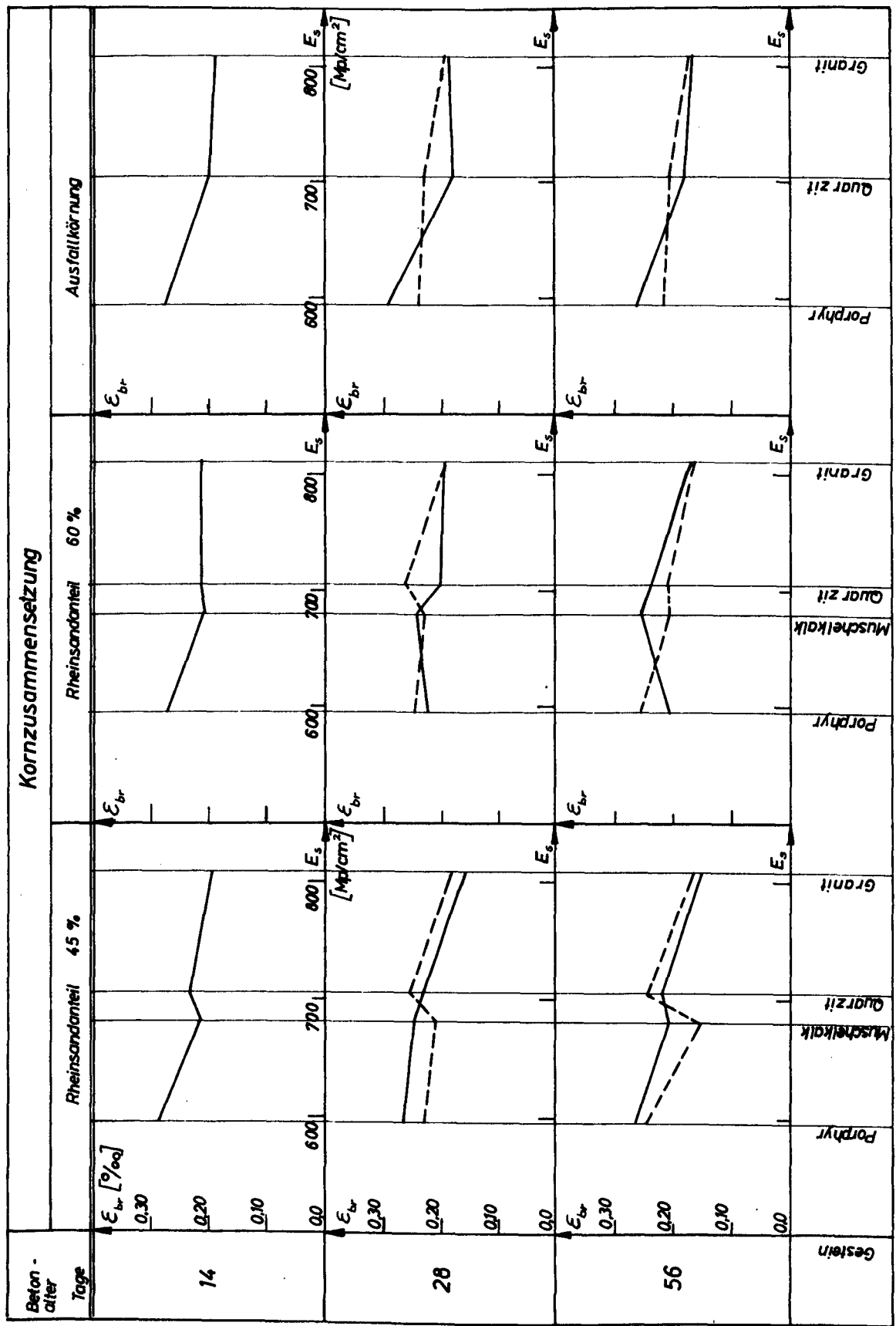


Obere Reihe : Lagerung "W"
 Untere Reihe : Lagerung "L"

— = 56 Tage

- - - = 28 Tage

- · - · - = 14 Tage

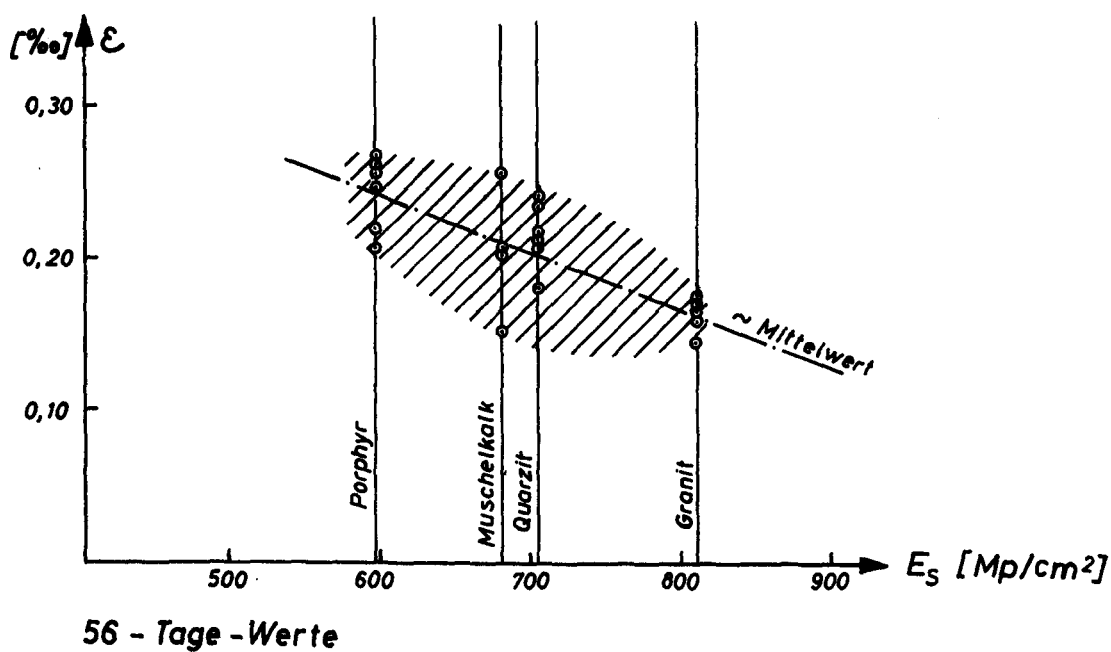
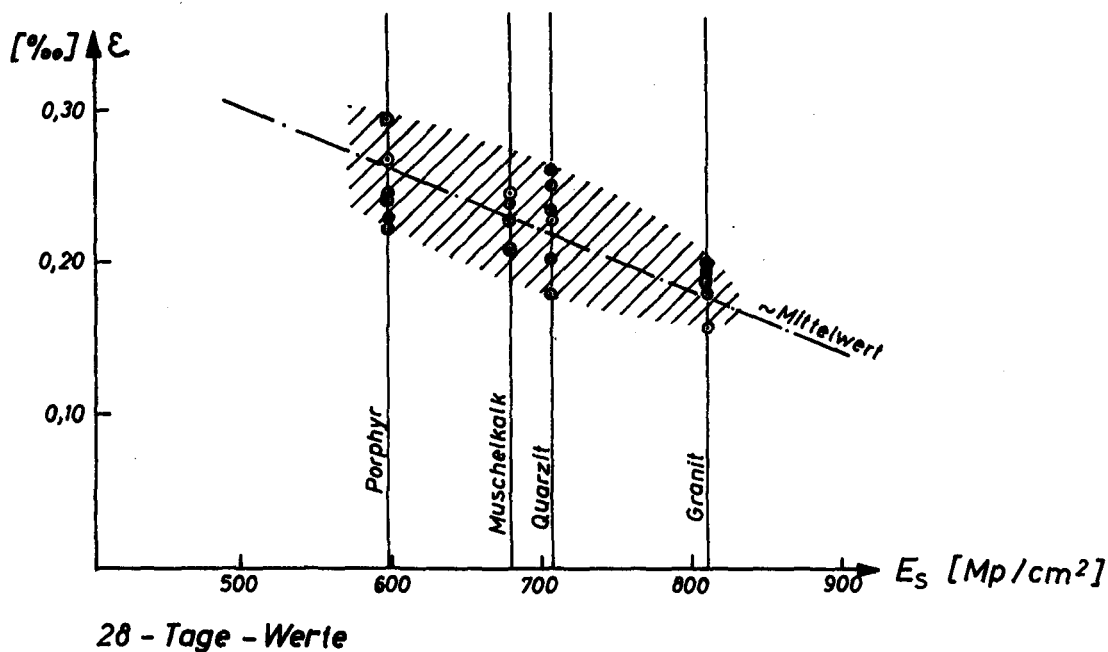


Beziehung zwischen Bruchdehnungen der Betone
und E-Modul der Zuschlagstoffe

Anlage 8a

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Hochschule Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

FA II/31

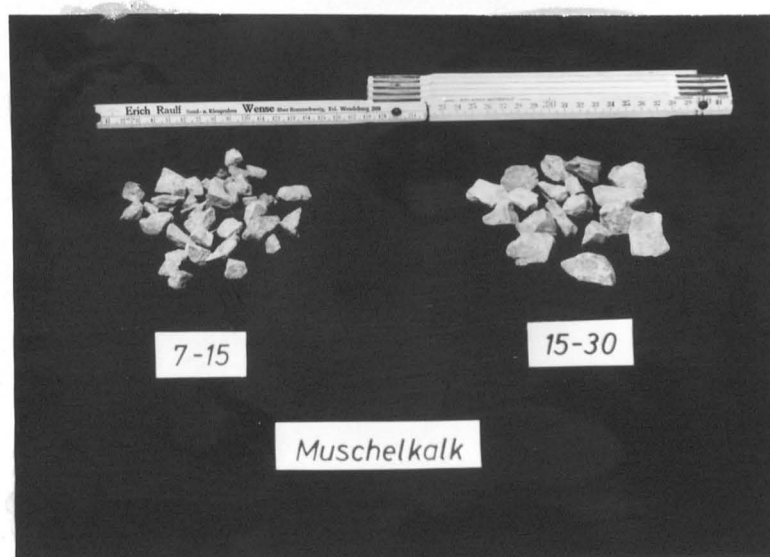
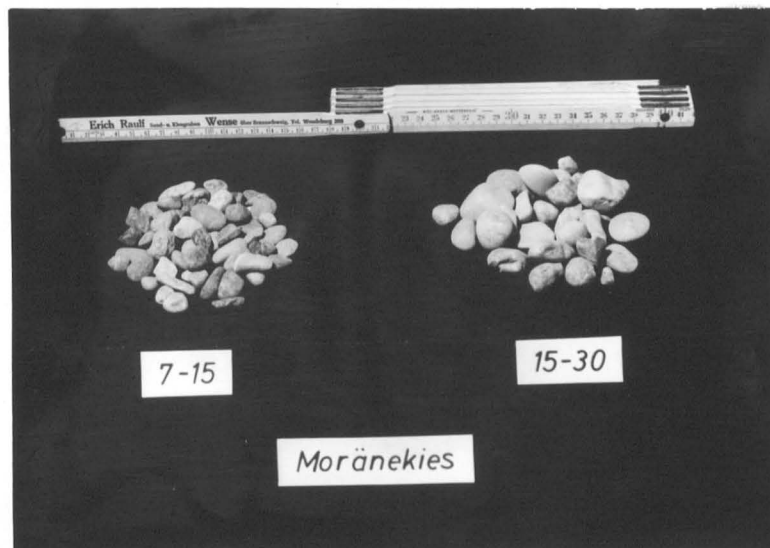
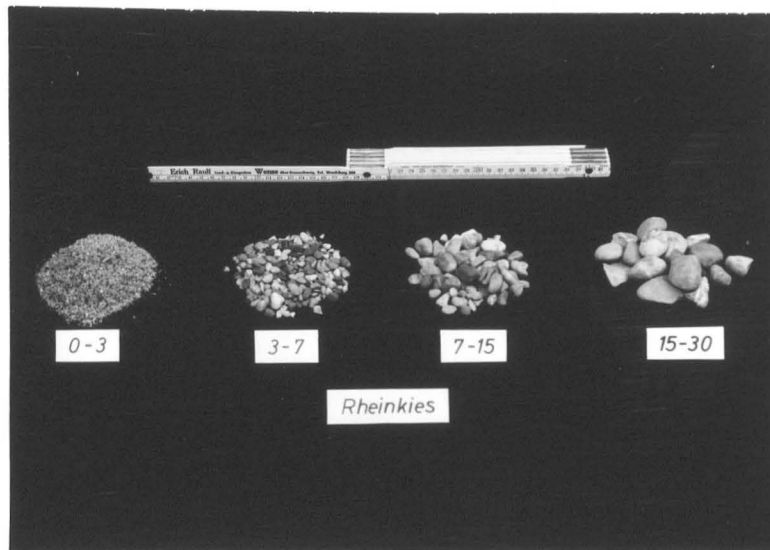


Beziehung zwischen Bruchdehnung der Betone und
E - Modul der Zuschlagstoffe

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Hochschule Braunschweig
Amliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Anlage 8b

FA II / 31

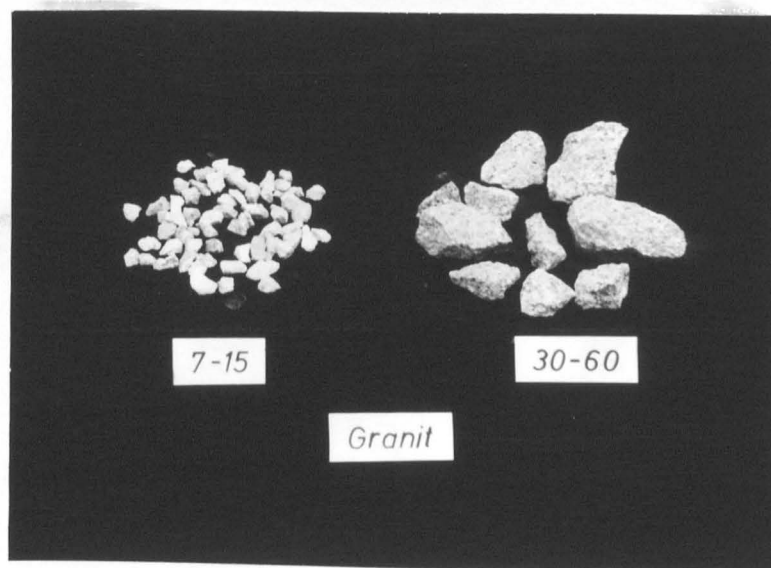
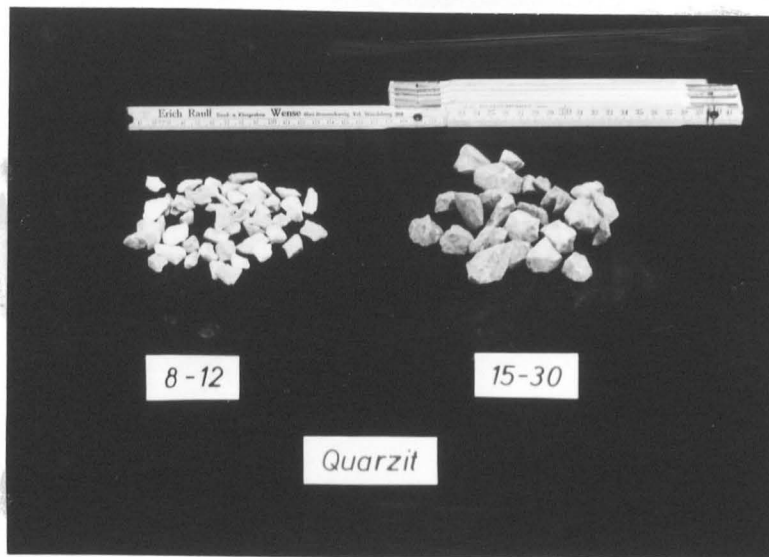


Zuschlagstoffe

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
 Technische Hochschule Braunschweig
 Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Anlage 9

FA II/31

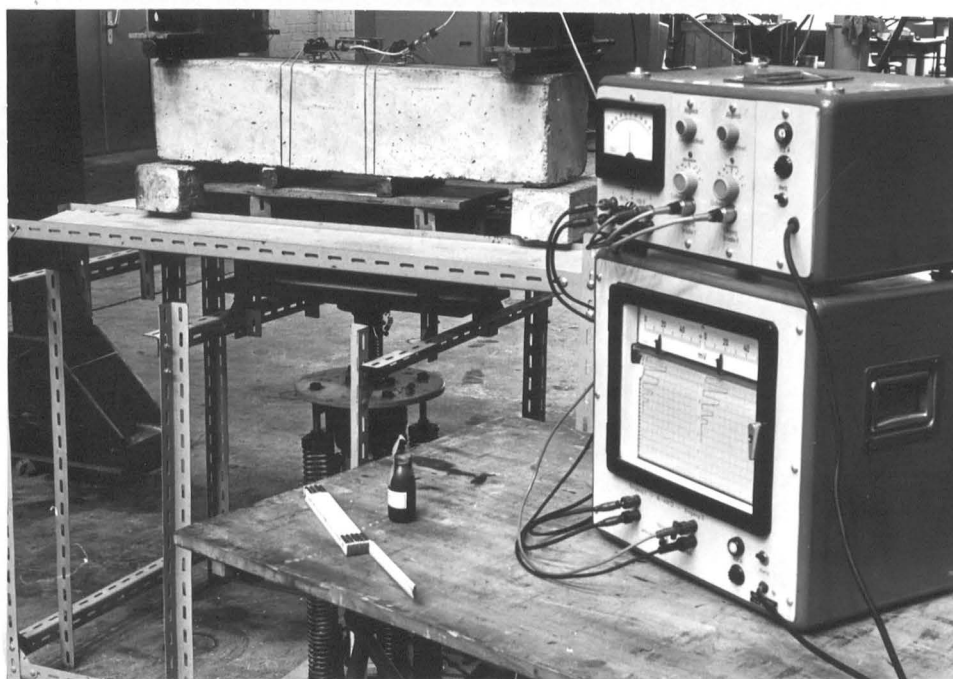
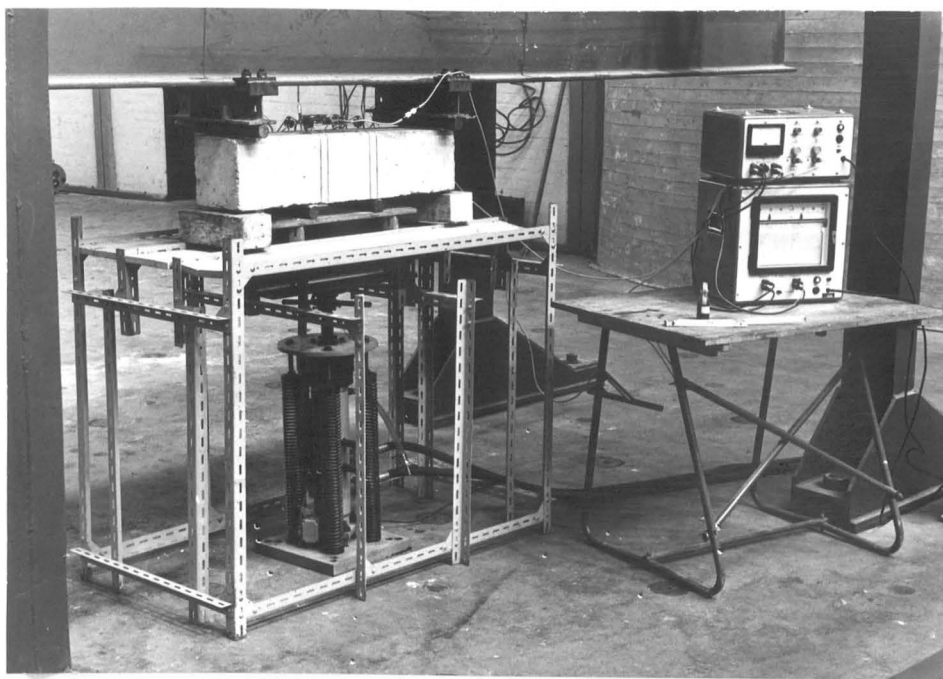


Zuschlagstoffe

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Hochschule Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Anlage 10

FA II / 31

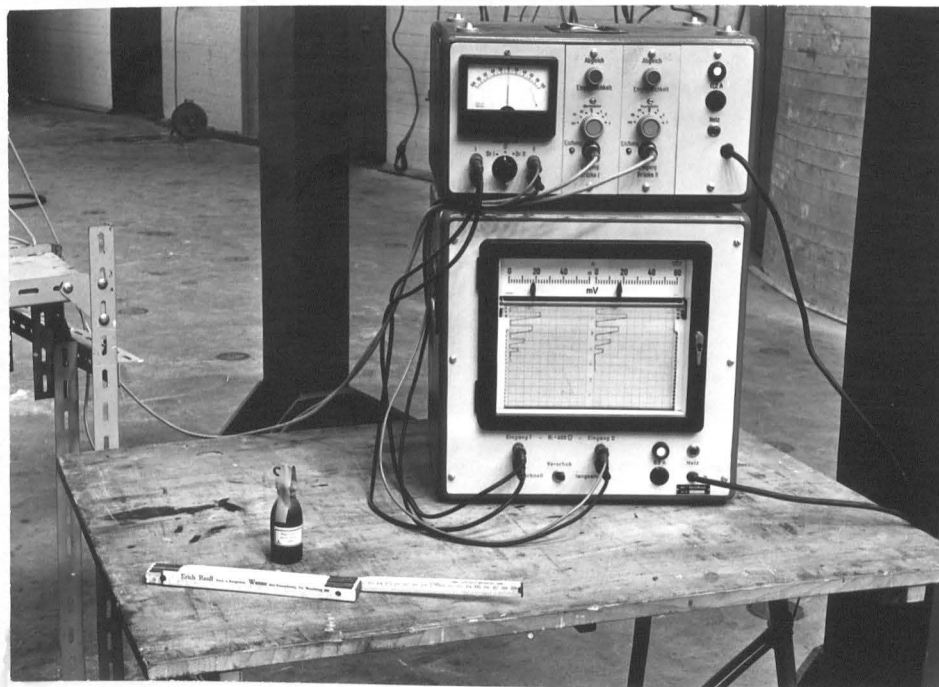
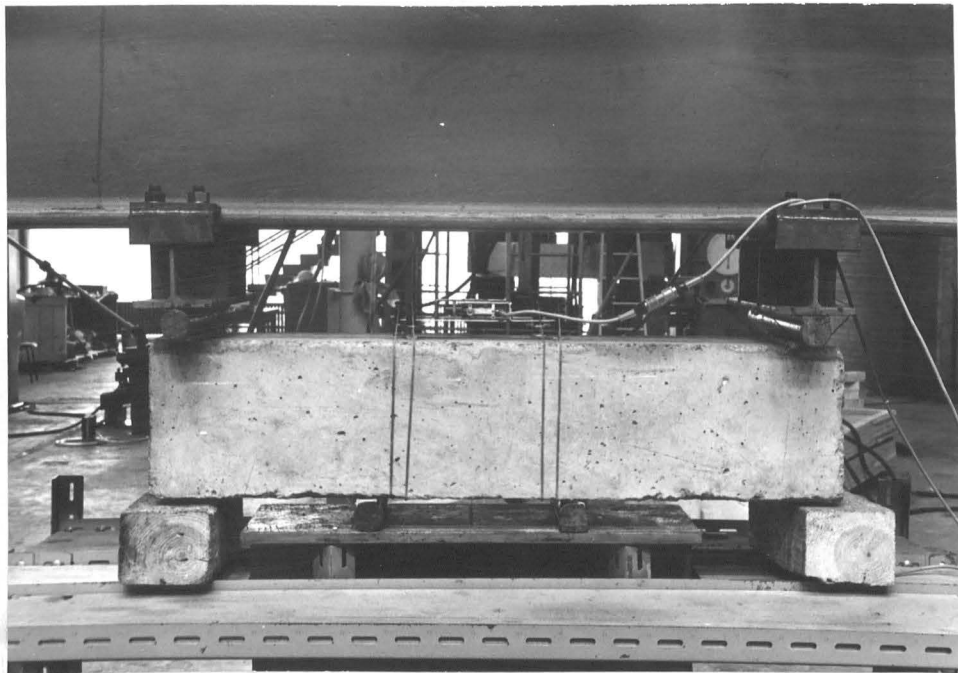


Versuchsaufbau ; Übersicht

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Hochschule Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Anlage 11

FA II / 31

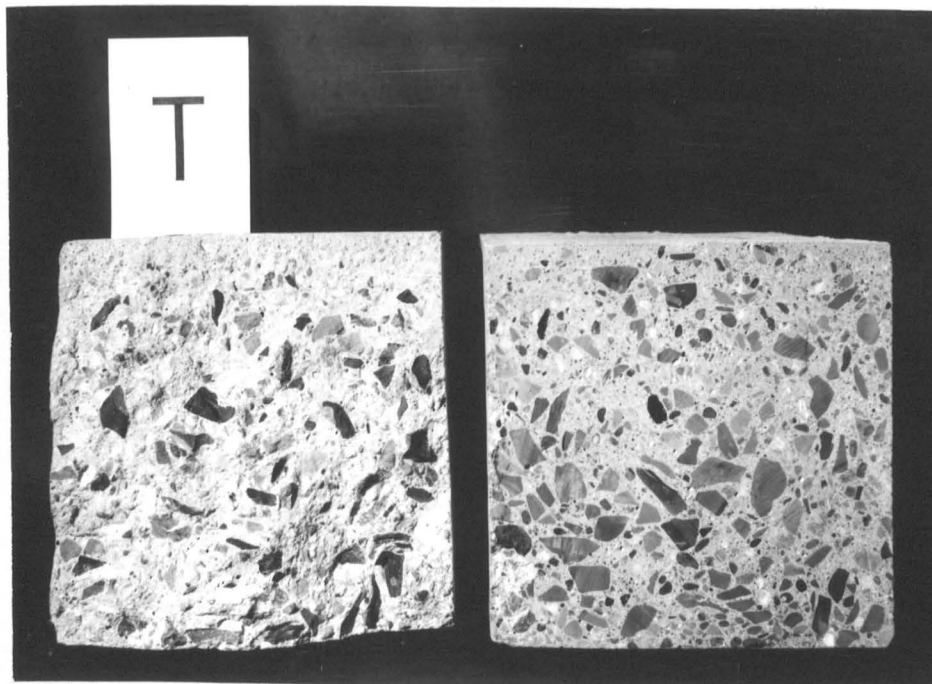
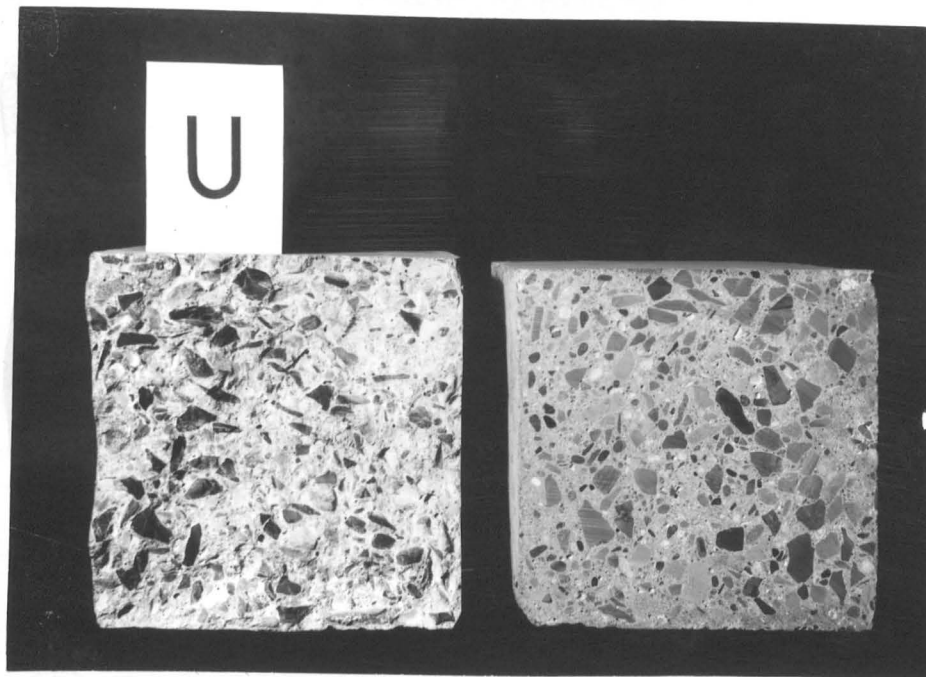


oben: Lasteintragung und elektronische Dehnungsmessung
 unten: Registrierung der Dehnungsmessung

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
 Technische Hochschule Braunschweig
 Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Anlage 12

FA II/31

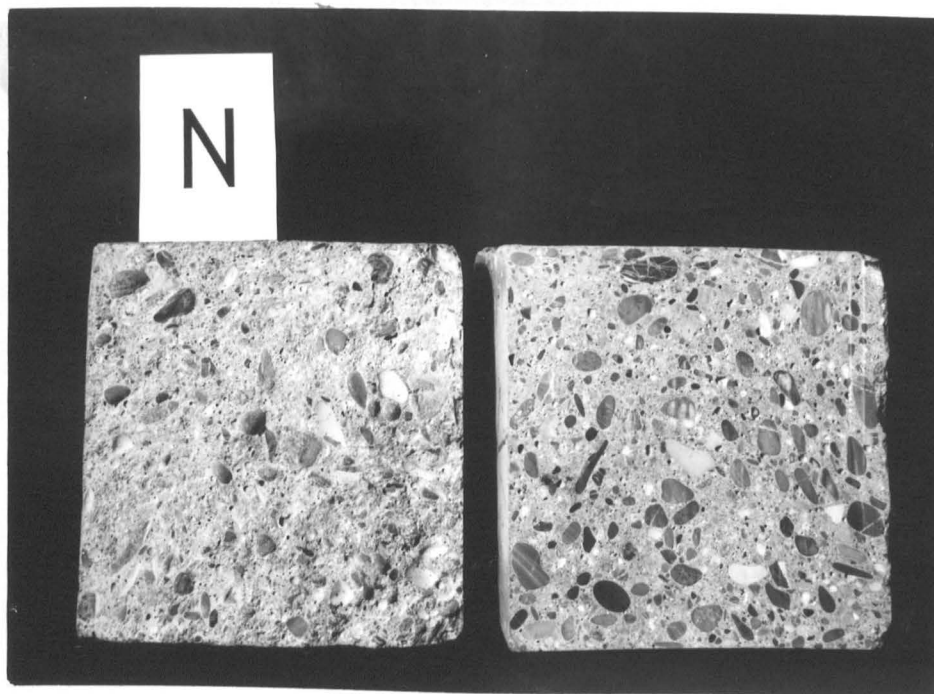
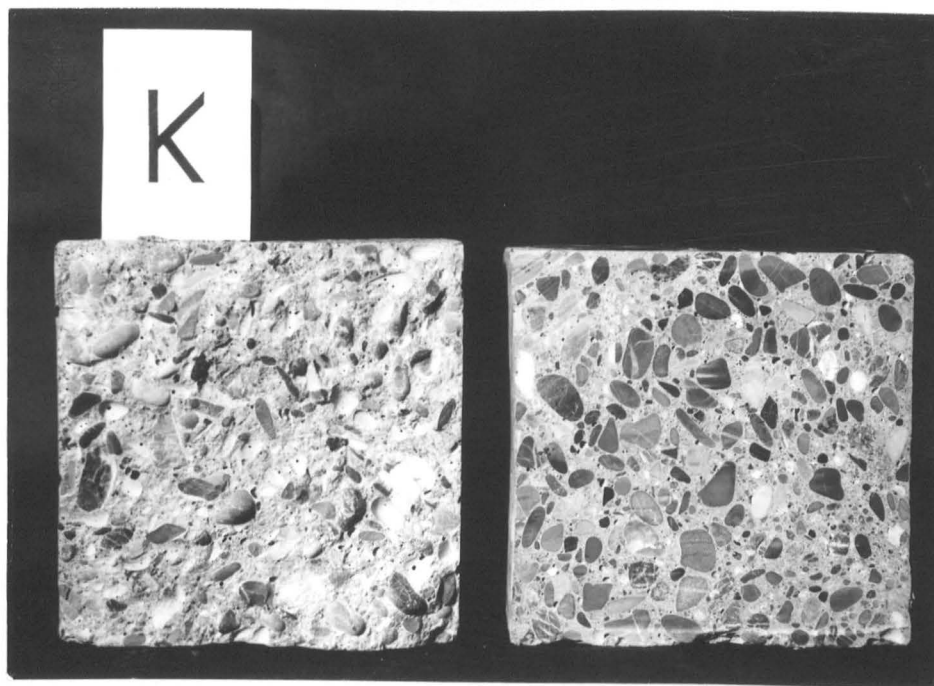


Bruch- u. Schnittbilder: U = Sieblinie "a", Muschelkalk
T = Sieblinie "b", Muschelkalk

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Hochschule Braunschweig
Ämliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Anlage 13

FA II/31

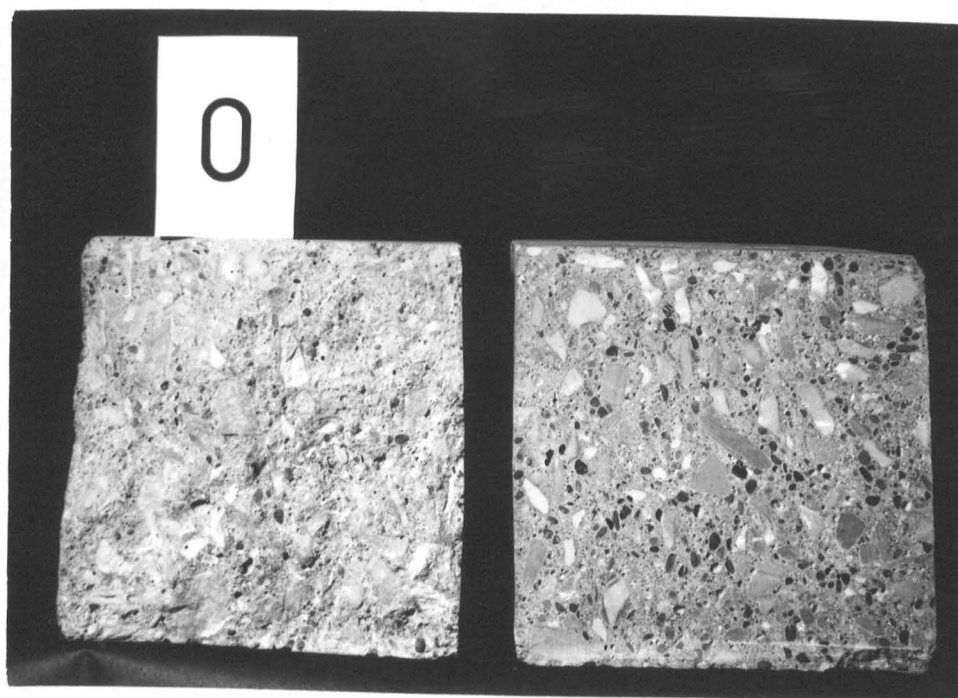
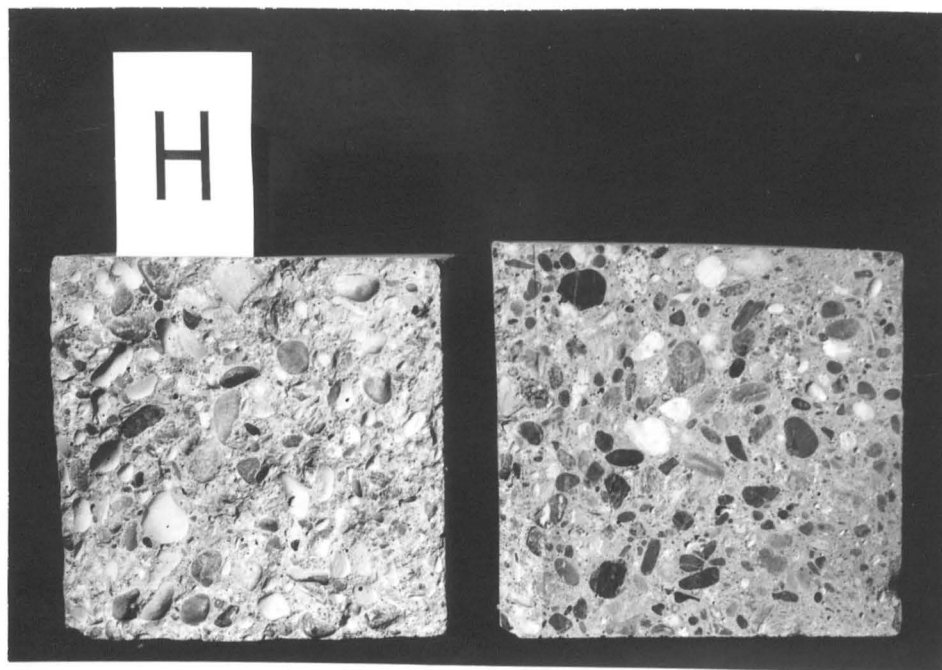


Bruch- u. Schnittbilder: K = Sieblinie "a", Moränekies
N = Sieblinie "b", Moränekies

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Hochschule Braunschweig
Ämliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Anlage 14

FA II/31

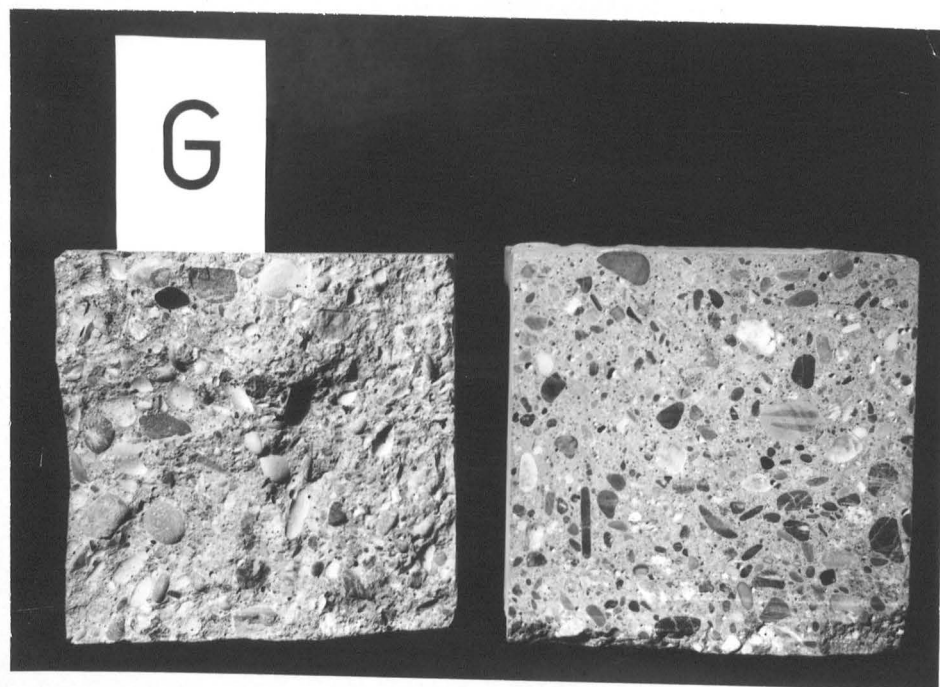


Bruch- u. Schnittbilder: H = Sieblinie "a", Rheinkies
O = Sieblinie "b", Quarzit

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Hochschule Braunschweig
Ämliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Anlage 15

FA II/31



Bruch- und Schnittbild: G=Sieblinie "b", Rheinkies

*Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Hochschule Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen*

Anlage 16

FA II/31